

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Návrh úpravy fluidního kotle pro snížení
emisí NO_x

Proposal to Amend of Fluidized Bed Boiler
to Reduce NO_x Emissions

Student:

Bc. Marek Goryczka

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Goryczka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh úpravy fluidního kotle pro snížení emisí NO_x**
Proposal to Amend of Fluidized Bed Boiler to Reduce NO_x Emissions
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh úpravy fluidního kotle K 11 v ENERGETICE TŘINEC, a.s. pro snížení emisí a zvýšení účinnosti kotle. Kotel spaluje směs černého a hnědého uhlí s přídavkem hutních plynů.

1. Vypracujte přehled fluidních kotlů ve vazbě na způsoby podávání paliva do kotle.
2. Vypracujte tepelnou a hmotovou bilanci kotle.
3. Navrhněte úpravu v dopravních trasách paliva do kotle, vypracujte schéma dopravní trasy paliva.
4. Vypracujte konstrukční návrh dopravy paliva a doložte jej výpočtem.
5. Vypracujte výkresovou dokumentaci kotle K 11 a doplňte ji dopravním zařízením.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] JANEBA, J., KARTÁK, K., Výpočty kotlů a parogenerátorů. 1. vyd. Praha: ČVUT 1985. 83 s
[2] RAJNIAK, I. a kol. Tepelno-energetické a emisné merania, Istre Science, Bratislava 97. ISBN 80-88683-20-3
[3] Zprávy katedry energetiky VŠB-TU Ostrava.

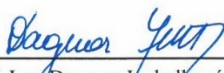
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



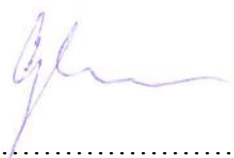

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 16. 5. 2016


.....
podpis studenta

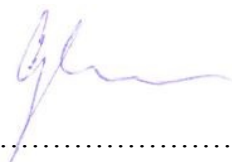
Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB–TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB–TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB–TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákony o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledky její obhajoby.

V Ostravě: 16. 5. 2016

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora:



.....
podpis studenta

Bc. Marek Goryczka

Vendryně 793, 739 94

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. GORYCZKA, M. *Návrh úpravy fluidního kotle pro snížení emisí NO_x*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 73 stran. Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech.

Diplomová práce se zabývá problematikou úpravy fluidního kotle pro snížení emisí NO_x. První část je zaměřena na popis podávání paliva u fluidních kotlů, primární a sekundární metody snižování emisí NO_x. Také seznamuje s možnými metodami a principy analyzátoru spalín. Dále je vypočtena tepelná a hmotová bilance kotle K11 ENERGETIKY TŘINEC. Druhá část práce se věnuje návrhu primárního opatření na kotli K11. Tato opatření spočívají v náhradě pseudopravy paliva do kotle za dopravu mechanickou a instalaci recirkulace spalín. V závěru jsou vyhodnoceny investiční náklady navržených variant primárních opatření. Schéma kotle K11 s navrženým dopravním zařízením a schéma navržené trasy recirkulačního potrubí je součástí přílohy.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. GORYCZKA, M. *Proposal to Amend of Fluidized Bed Boiler to Reduce NO_x Emissions*: Master Thesis. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of energy, 2016, 73 p.
Thesis, head: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech.

This thesis deals with the amendment of fluidized bed boiler in order to reduce NO_x emissions. The first part is focused on the description of the fuel feeding system of the fluidized bed boiler as well as the primary and secondary methods of reducing NO_x emissions. Moreover, it presents possible methods and principles of the flue gas analyzer. Furthermore, the heat and mass balance of the K11 ENERGETIKA TŘINEC boiler is calculated. The second part deals with the design of primary measures on the K11 boiler. These measures consist of replacing the pneumatic fuel feeding to the boiler with mechanical feeding and the installation of flue gas recirculation system. At the end of the thesis investment costs and primary measures variants are evaluated. The enclosure comprises of the K11 boiler diagram with the proposed fuel feeding equipment and the diagram of the proposed recirculation pipeline route.

Obsah	strana
1. ÚVOD	11
2. FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ	12
2.1 Druhy fluidních kotlů	12
2.2 Podávání paliva u fluidních kotlů	13
2.2.1 Kotle se stacionární fluidní vrstvou	15
2.2.2 Kotle s expandující fluidní vrstvou.....	15
2.2.3 Kotle s cirkulující fluidní vrstvou.....	16
3. EMISE	19
3.1 Jednorázové měření emisí	19
3.2 Kontinuální měření emisí	20
3.3 Vlastnosti škodlivin.....	21
3.4 Výpočet hmotového toku emisí	22
3.5 Provozní měření emisí K 11.....	23
3.5.1 Fotometrické analyzátory	23
3.5.2 Elektrochemické analyzátory.....	24
3.5.3 Optický analyzátor tuhých částic	26
4. OXIDY DUSÍKU	27
4.1 Vznik emisí NO _x	27
4.2 Snižování emisí NO _x	28
4.2.1 Primární metoda.....	28
4.2.2 Sekundární metoda	28
5. FLUIDNÍ KOTEL K11	31
5.1 Technický popis kotle K11	31
5.2 Parametry popis kotle K11	32
5.3 Palivo kotle K11	32
6. BILANCE KOTLE K11	33
6.1 Energetická bilance kotle	34
6.2 Palivo	35
6.2.1 Prvkový rozbor paliva.....	36
6.2.2 Přepočet složení paliva	37
6.3 Výpočet stechiometrického objemu spalovacího vzduchu a spalin .	39
6.4 Parametry spalin při nedokonalém spalování	41
6.5 Určení střední měrné tepelné kapacity spalin	44
6.6 Určení poměrných tepelných ztrát	47
6.7 Výpočet nepřímé účinnosti	48
6.8 Tepelná a hmotnostní bilance spalování při odsiřování spalin	49
6.9 Odsiřování spalin	49

7.	NÁVRH ÚPRAVY DOPRAVNÍ TRASY PALIVA DO KOTLE	54
7.1	Popis současného stavu dopravy paliva	54
7.2	Popis navržené úpravy dopravy paliva	55
7.2.1	Korečkový dopravník	56
7.2.2	Šnekový dopravník	57
7.3	Hrubý rozpočet mechanické dopravy.....	59
8.	NÁVRH RECIRKULACE SPALIN	60
8.1	Popis navrženého umístění recirkulace spalin	60
8.1.1	Výpočet množství recirkulovaných spalin.....	61
8.1.2	Dimenze recirkulačního potrubí	62
8.1.3	Aerodynamický výpočet.....	63
8.1.4	Radiální ventilátor	64
8.1.5	Izolace potrubí spalinového potrubí	65
8.2	Investiční náklady navržené recirkulace spalin.....	66
9.	ZÁVĚR	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK	71

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A INDEXŮ

ZNAČENÍ A JEDNOTKY

značka	veličina	jednotka
A	Obsah popela	kg.kg ⁻¹ ; %
A ₁ - A ₁₀ ; A; A ₀ ; A _α	Konstanty rovnice pro výpočet $\overline{c_s}$	1
A ^d	Obsah popela v sušině	kg.kg ⁻¹ ; %
B ₁ - B ₁₀ ; B; B ₀ ; B _α	Konstanty pro výpočet $\overline{c_s}$	1
C	Obsah uhlíku	kg.kg ⁻¹ ; %
C ₁ - C ₁₀ ; C; C ₀ ; C _α	Konstanty pro výpočet $\overline{c_s}$	1
D _e	Hydraulický průměr potrubí	m
E _n	Koncentrace za normálního stavu	mg.m ⁻³
E _p	Koncentrace za daných podmínek	mg.m ⁻³
F	Faradayaova konstanta	C.mol ⁻¹
H	Obsah vodíku	kg.kg ⁻¹ ; %
K _{Pt}	Koeficient korekčního faktoru	1
L	Vzdálenost	m
M	Molová hmotnost	kg.kmol ⁻¹
N	Obsah dusíku	kg.kg ⁻¹ ; %
O	Obsah kyslíku	kg.kg ⁻¹ ; %
O ₂ ^r	Referenční obsah kyslíku ve spalínách	%
O ₂ ^m	Změřený obsah kyslíku ve spalínách	%
\dot{Q}	Tepelný tok	kJ.s ⁻¹ ; MW
Q _i ^r	Výhřevnost	kJ.kg ⁻¹
R	Molová plynová konstanta	J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹
R ₁ - R ₁₀	Pomocné konstanty stechiometrických objemů	1
S	Obsah síry	kg.kg ⁻¹ ; %
S _t ^d	Obsah síry v sušině	%
T	Termodynamická teplota	K
U _e	Elektromotorické napětí	V
V	Objem vzduchu a spalín	m ³ .kg ⁻¹
V ₁ - V ₄	Pomocné hodnoty objemů spalín	m ³ .kg ⁻¹
V ^{daf}	Obsah prchavé hořlaviny	%
W	Obsah vody	kg.kg ⁻¹ ; %
W _t ^r	Obsah vody v surovém palivu	kg.kg ⁻¹ ; %
X	Hmotnostní podíl tuhých zbytků	kg.kg ⁻¹

a_1	Podíl uhlíku paliva spáleného na CO ₂	kg.kg ⁻¹
b	Podíl nespáleného uhlíku paliva	kg.kg ⁻¹
c	Koncentrace absorbující složky	l.mol ⁻¹
$\overline{c_s}$	Střední měrná tepelná kapacita spalin	kJ.m ⁻³ .K ⁻¹
$\overline{c_{si}}$	Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	kJ.m ⁻³ .K ⁻¹
d	Průměr	m
h	Entalpie	kJ.kg ⁻¹
l	Tloušťka vrstvy látky	cm
\dot{m}	Hmotnostní průtok	kg.s ⁻¹
n_{Ca}	Součinitel přebytku vápníku	1
n_s	Stupeň odsíření	1
p	Tlak	Pa
p_{celk}	Celkový tlak	Pa
t	Teplota	°C
$t_{\check{c}}$	Čas	s
v_s	Rychlost proudění	m.s ⁻¹
α	Součinitel přebytku vzduchu	1
ε	Molární absorpční koeficient	l.mol ⁻¹ .cm ⁻¹
ζ	Relativní tepelná ztráta	1; %
η	Účinnost	1; %
ρ	Hustota	kg.m ⁻³
λ	Součinitel tření	1
v	Objem vlhkého vzduchu	1
ξ	Součinitel místních ztrát	1
φ	Světelný tok vystupující z látky	W
φ_0	Světelný tok vstupující do vrstvy látky	W

VÝZNAM INDEXŮ

index	význam	index	význam
celk	Celkový	p	Vztažné podmínky
č	Čas	Pt	Korekční faktor
e	Hydraulický průměr	s	Rychlost
i	Člen souborů	t	Celkový obsah
n	Normální stav	0	Počáteční

VÝZNAM EXPONENTŮ

exponent	význam	exponent	význam
d	Sušina	o	Organická hmota
daf	Prchavá hořlavina	r	Surové palivo

VÝZNAM ZKRATEK

zkratka	význam	zkratka	význam
ČR	Česká republika	NSCR	Selektivní nekatalytická redukce
DSP	Dokumentace skutečného provedení		
EKO	Ohřívač vody	Prim. V	Primární ventilátor
EO	Elektrostatický odlučovač	SCR	Selektivní katalytická redukce
LP	Ložový popel		
LUVO	Ohřívač vzduchu	Sek. V	Sekundární ventilátor
NDIR	Nedisperzní infračervená spektrometrie	TZL	Tuhé znečišťující látky
		ÚP	Úletový popel

CHEMICKÉ VZORCE

vzorec	látka	vzorec	látka
CaCO ₃	Uhličitán vápenatý	NO _x	Oxidy dusíku
CaO	Oxid vápenatý	N ₂ O	Oxid dusný
CO	Oxid uhelnatý	N ₂ O ₃	Oxid dusitý
CO ₂	Oxid uhličitý	N ₂ O ₅	Oxid dusičný
HNO	Kyselina dusná	O ₂	Kyslík
HNO ₃	Kyselina dusičná	SO _x	Oxidy síry
NO	Oxid dusnatý	SO ₂	Oxid siřičitý

1. ÚVOD

Energii z fosilních paliv získáváme spalováním. Nejčastěji spalujeme ve velkých spalovacích zařízeních, jako jsou elektrárny a teplárny, kde dochází k přeměně uložené chemické energie v palivu na teplo a elektrickou energii. Výroba elektrické energie v uhelných elektrárnách představuje v České republice cca 50 % podíl. Tento vysoký podíl je ovlivněn soběstačností díky zásobám uhlí a také tradicí.

Zejména díky velmi účinnému způsobu spalování a změnou ekologických podmínek v provozování energetických zařízení se v ČR začaly stavět fluidní kotle. Od roku 1994, kdy byl v ENERGETICE TŘINEC postaven první fluidní kotel, se situace změnila a nyní je v ČR provozováno několik desítek fluidních kotlů.

Spalování fosilních paliv je spojeno s vypouštěním škodlivých látek do ovzduší. Jedná se především o emise NO_x , SO_x , CO_x a také tuhé znečišťující látky. Tyto znečišťující látky ovlivňují životní prostředí a naše zdraví. V dnešní moderní době s rozvojem průmyslu a techniky je zapotřebí chránit ovzduší, proto jsou zavedena přísná opatření v podobě emisních limitů, jež je nutné dodržovat. Tyto limity - znamenající koncentraci znečišťujících látek, byly v posledních letech značně sníženy. Kromě ekologického hlediska je dalším důvodem ke snižování emisí ekonomika provozu. Nejen růst ceny paliv a energií, ale také zvyšování účinnosti kotlů, má významný ekonomický přínos, v němž optimalizace a řízení spalovacích procesů je významným prvkem.

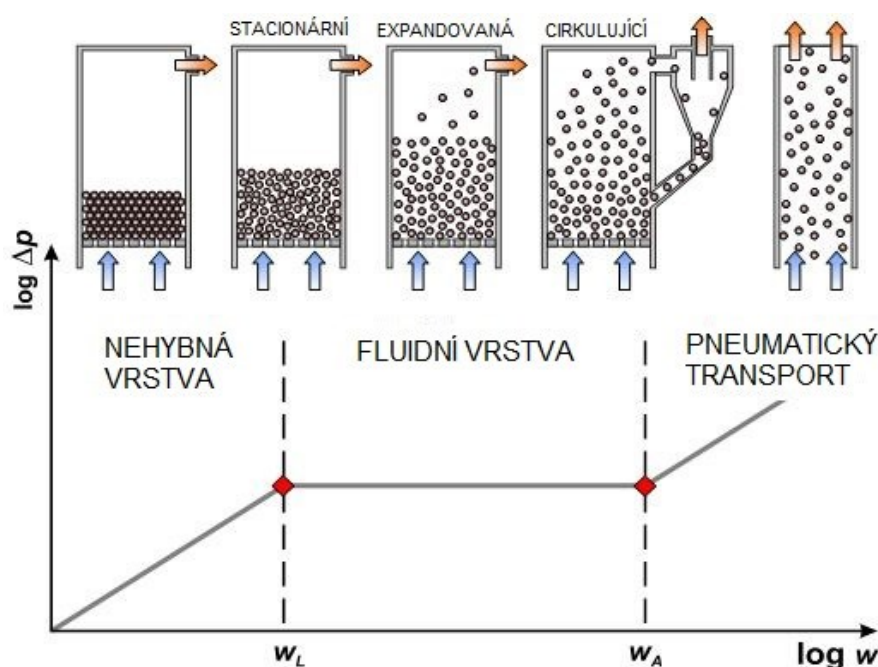
To vede provozovatele nejen k výstavbě nových kotlů, ale také u stávajících energetických zařízení k provedení úprav, které zabrání vzniku nadměrných emisních plynů v samotném zárodku. Toto opatření nazýváme primární. Další opatření v podobě redukce již vytvořených emisí nazýváme sekundární.

Tato diplomová práce bude zaměřena na nalezení primárního opatření, které vede k redukci emisí oxidu dusíku při provozu fluidního kotle K 11 ENERGETIKY TŘINEC. V teoretické části budou popsány možné primární a sekundární opatření pro snížení emisí oxidu dusíku. Bude proveden výpočet tepelné a hmotové bilance fluidního kotle. Dále budou navrženy úpravy pro snížení emisí oxidu dusíku a vyhodnocení investičních nákladů pro realizaci navržených úprav.

2. FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [1], [2] a [3]

Fluidizace je procesem vzniku dynamického vznosu pevných částic v proudu fluidizačního media. Tento vznos vzniká na základě proudění plynu přes vrstvu zrnitých částic umístěných na pórovitém podloží. V momentě překročení rovnováhy mezi aerodynamickými silami a tíhou částic vzniká takzvaná fluidní vrstva. Její další podobu bude ovlivňovat rychlost průtoku fluidizačního media (viz obrázek 2.1). Fluidizovaná vrstva v důsledku celkového pohybu částic nabývá vlastnosti jako reálná kapalina.



Obr. 2.1: Vznik a základní typy fluidní vrstvy [1]

Fluidní kotel pracuje na principu fluidizace, kde dochází k intenzivnímu promíchávání a provzdušnění spalované směsi. Využívá velmi dobrého přenosu tepla a hmoty. Výhodou fluidních kotlů je použití přímého odsíření pomocí dávkování vápence do fluidní vrstvy, a také vysoká účinnost s nízkou tvorbou emisí. Dále spalování různých druhů paliv a jejich kombinací (černé uhlí, hnědé uhlí, biopaliva a odpady). Další výhodou je možnost odstavení do teplé zálohy a následné rychlé najetí. Nevýhodami jsou: složitější technologie v porovnání s klasickým granulačním kotlem, práce v abrasivním prostředí kotle, vyšší spotřeba elektrické energie ovlivněná velkou spotřebou vzduchu a delší dobou najíždění ze studeného stavu.

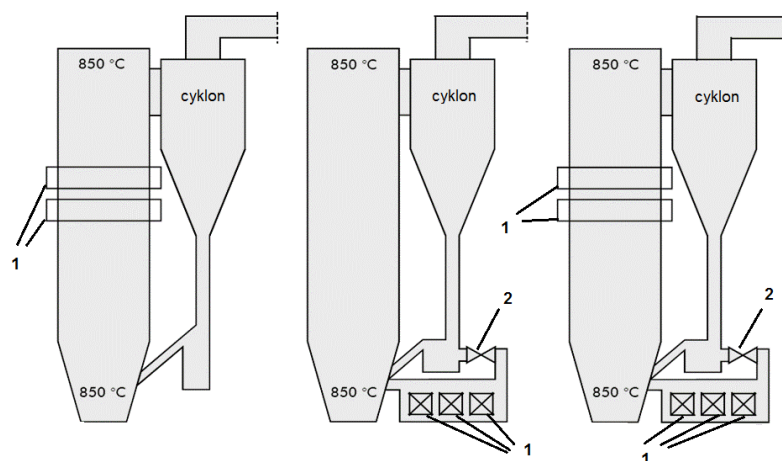
2.1 Druhy fluidních kotlů

Fluidní kotle dělíme dle struktury fluidní vrstvy a dle tlaku v ohništi, neboli pracovnímu tlaku.

Stacionární fluidní kotle - vlivem dynamického účinku fluidního vzduchu, který protéká fluidním roštem, dochází k porušení rovnováhy fluidní vrstvy v ohništi. Vrstva následně expanduje, zvětšuje objem a má zřetelnou hladinu. Tuto vrstvu nazýváme také jako bublinkující. Popelovina bývá odváděna pásovým roštem. Tento typ kotle koncepce IGNIFLUID je zobrazen ve schématu (2.6).

Fluidní kotle s expandující fluidní vrstvou – do spalovacího prostoru je přiváděna část spalovacího vzduchu přes fluidní rošt a zbývající část spalovacího vzduchu je přiváděna do horní části ohniště, kde dochází k dohoření paliva. Tyto kotle bývají dvouprostorové, neboli dvoutahové. Tento typ kotle koncepce DUKLAFLUID je zobrazen na obrázku (2.7).

Fluidní kotle s cirkulující vrstvou – fluidizace je prováděna při vyšších rychlostech. Tento kotel má jako odlučovací zařízení - cyklonový odlučovač. V odlučovači dochází k odloučení spalin a materiálu fluidní vrstvy. Materiál je vrácen zpět do ohniště. Tento typ kotle bývá také v provedení s externím chladičem popele. Schéma (2.2) znázorňuje možnost regulace teploty fluidní vrstvy.



Obr. 2.2: Schéma kotlu s cirkulující fluidní vrstvou bez a s externím chladičem: 1 – teplosměnné plochy, 2 – fluidní uzavěr [1]

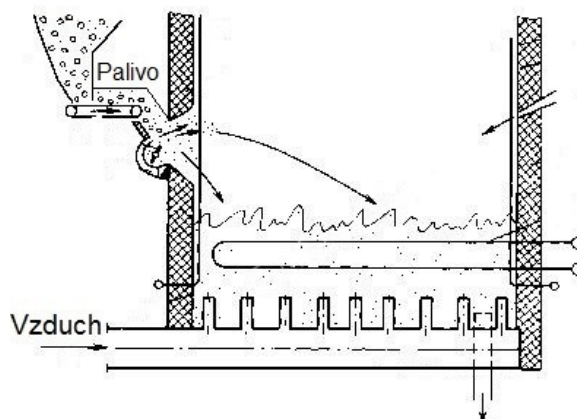
Atmosférické fluidní kotle – tento typ je nejčastěji používán, viz schéma (2.9). Fluidní vrstva cirkuluje mezi vlastním spalovacím prostorem nebo pomocí venku umístěného cyklonového odlučovače.

Tlakový fluidní kotel – pracuje při vysokém tlaku, energie obsažené ve stlačených spalinách expandují v plynové turbíně. Turbína společně s kompresorem, který je umístěn na společné hřídeli, dopravuje stlačený vzduch zpět do fluidního kotle. Tento typ kotle není v dnešní době v České republice provozován.

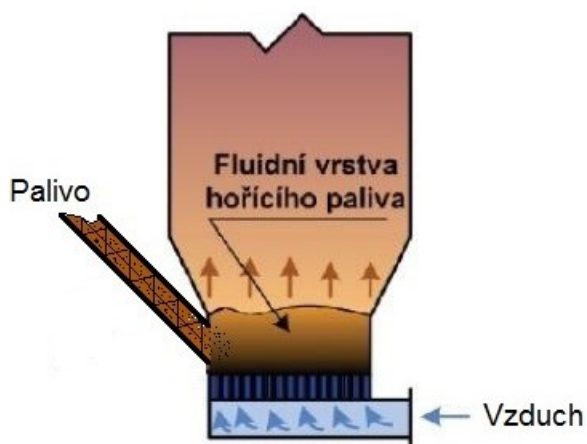
2.2 Podávání paliva u fluidních kotlů

Podávání paliva do fluidních kotlů dělíme na pneumatické a mechanické (gravitační). Dále na dopravu paliva pod fluidní lože (vrstvu) viz schéma (2.5), do fluidního lože viz

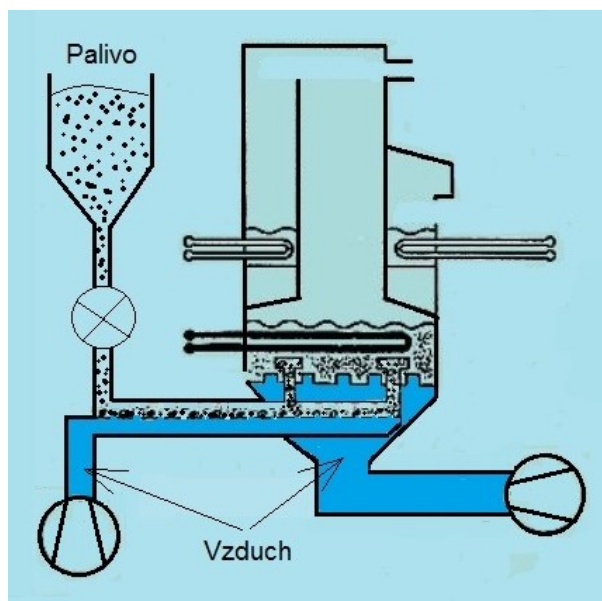
schéma (2.4) a nad fluidní lože viz schéma (2.3). V další kapitole bude popsán vybraný přehled fluidních kotlů v České republice s popsanou dopravou paliva do kotle.



Obr. 2.3: Fluidní kotel: doprava paliva nad fluidní vrstvu



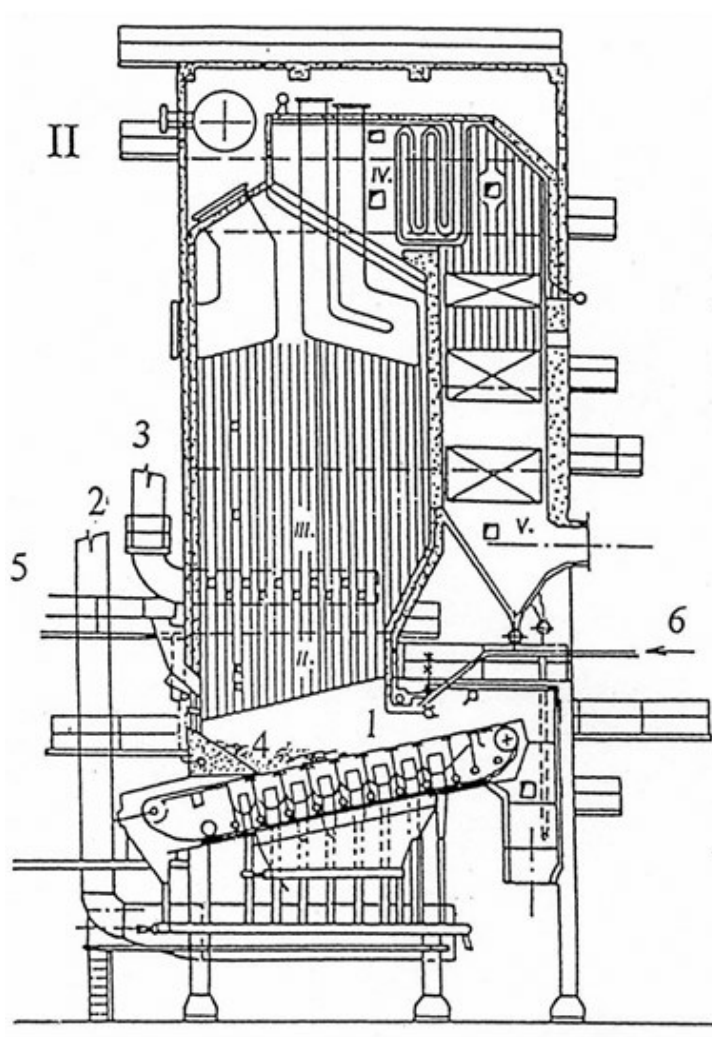
Obr. 2.4: Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou: doprava paliva do fluidní vrstvy



Obr. 2.5: Fluidní kotel: pneumatická doprava paliva pod fluidní vrstvu

2.2.1 Kotle se stacionární fluidní vrstvou

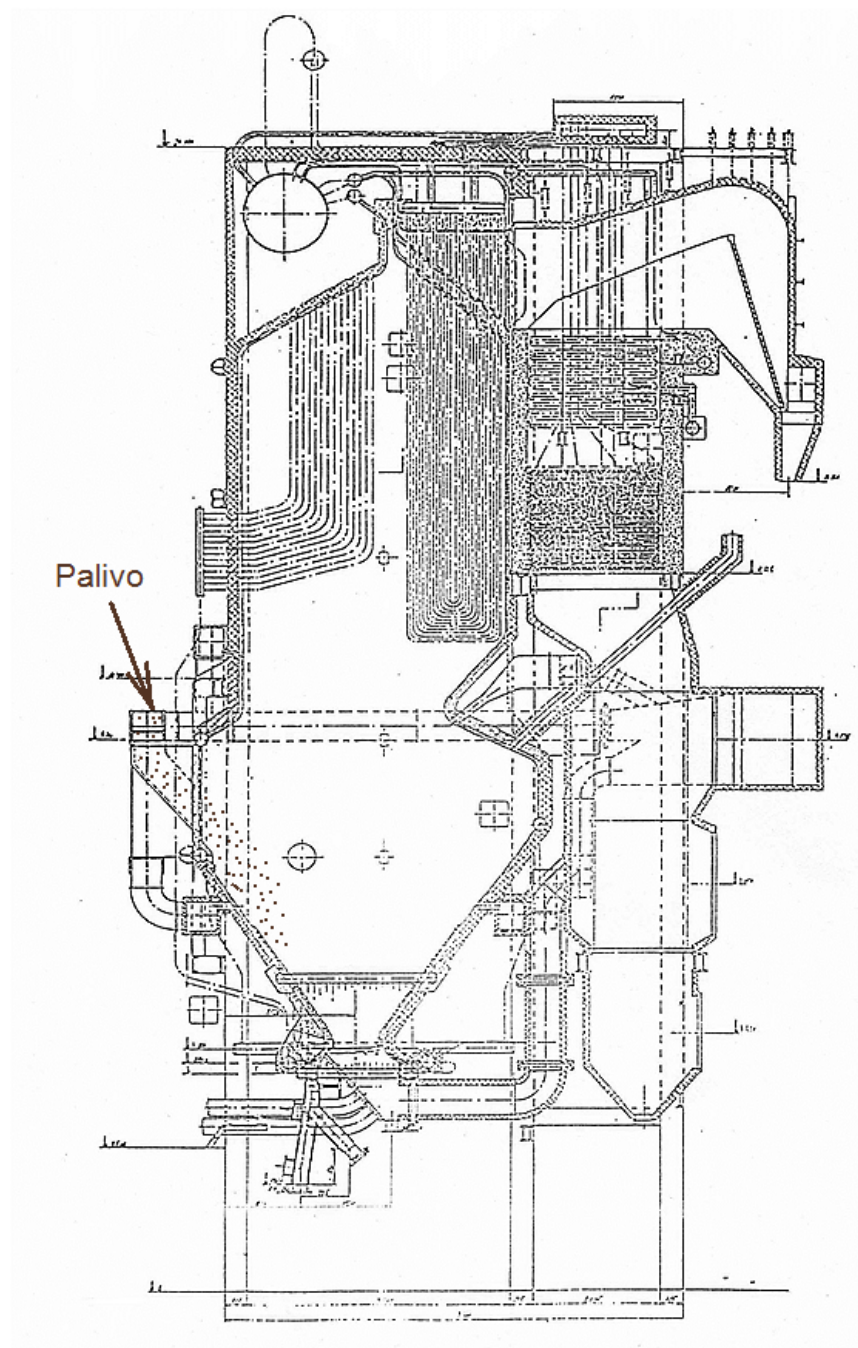
- Kotel K1 a K2, koncepce IGNIFLUID, Bioceli Paskov, a.s.. Drcené palivo o velikosti 0 – 10 mm je gravitačně dopravováno skluzem a svodkou do fluidní vrstvy v přední části kotle. Viz schéma (2.6).



Obr. 2.6: Fluidní kotel koncepce IGNIFLUID: doprava paliva nad fluidní vrstvou [1]

2.2.2 Kotle s expandující fluidní vrstvou

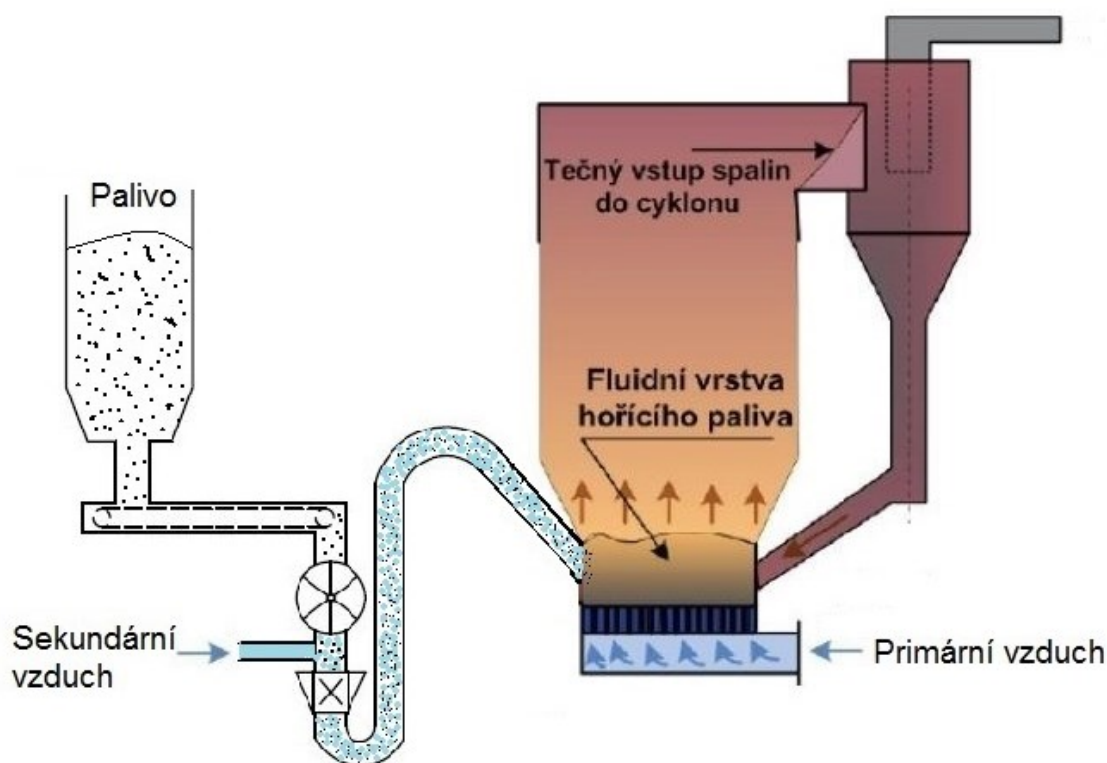
- Kotel K13 a K14, koncepce DUKLAFLUID v Chemických závodech Sokolov. Drcené palivo o velikosti 0 – 10 mm padá do ohniště skluzu na přední straně spalovací komory. Viz schéma (2.7).



Obr. 2.7: Fluidní kotel K14, Duklafluid v Chemických závodech Sokolov [2]

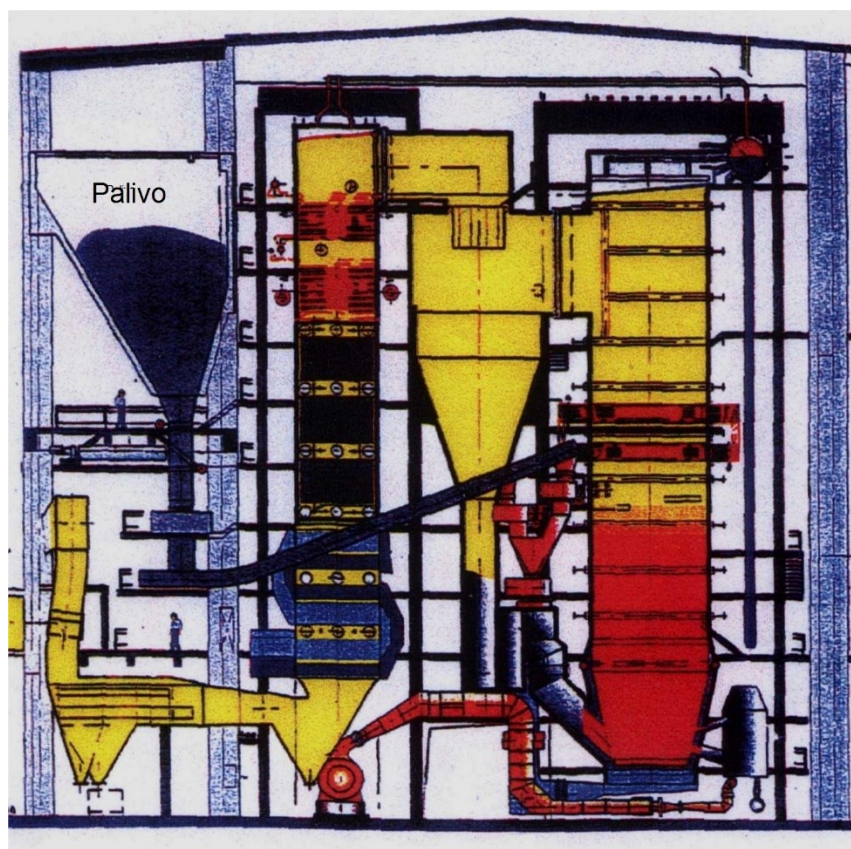
2.2.3 Kotle s cirkulující fluidní vrstvou

- Kotle K11 a K12, koncepce Lurgi, ENERGETIKA TŘINEC, a.s. Palivo je odebíráno řetězovými dopravníky ze dvou zásobníků surového paliva a přiváděno do dvou drtičů. Drcené palivo o velikosti 0 – 6 mm je pneumaticky dopravováno do spalovací komory kotle. Nosným médiem drceného uhlí je sekundární vzduch. Viz schéma (2.8).



Obr. 2.8: Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou: schéma pneumatická doprava paliva

- Kotel K14, ENERGETIKA TŘINEC, a.s. Palivo je odebíráno řetězovými dopravníky ze dvou bunkrů a přiváděno do dvou drtičů. Drcené palivo o velikosti 0 – 6 mm je pomocí řetězového dopravníku a šnekového dopravníku dopravováno do turniketového podavače. Dále přes fluidní uzávěr až do spalovací komory kotle.
- Kotle K7 a K8, Elektrárna Poříčí. Palivo je upravené tříděním a drcením. Takto upravené palivo se gravitačně dopravuje na řetězový dopravník s uzávěry a dále do zauhlovacích šachet ohniště kotle.
- Kotel FK1, Elektrárna Tisová. Palivo je tříděno na kotoučových třidičích (frakce pod 15 mm) a hrubší zrna jsou drcena ve dvou válcových mlýnech s následným dalším tříděním v kotoučových třidičích. Takto upravené palivo je dopravováno vertikálním pásovým dopravníkem přes turniket na řetězový dopravník přes skluzy do 4 zauhlovacích turniketů s uzávěry a dále přes ně do 4 zauhlovacích šachet ohniště.
- Kotle FK1 a FK2, Elektrárna Hodonín. Palivo prochází třidičem a je drcené. Drcené palivo se dopravuje řetězovým dopravníkem přes fluidní uzávěr s cirkulujícím popelem do ohniště. Viz schéma (2.9).



Obr. 2.9: Schéma kotle FK1 a FK2 v ČEZ, a.s. Elektrárně Hodonín [2]

- Kotel K1, Teplárna Zlín. Palivo je odebíráno řetězovými dopravníky ze dvou bunkrů a přiváděno do dvou drtičů. Pod drtiči jsou umístěny dva šikmé řetězové dopravníky, které dopravují uhlí spolu s aditivem do svodek popela za sífony a dále do spalovací komory kotle.
- Kotel K5 (compact), Teplárna Olomouc. Palivo je přiváděno do fluidizačního lože čtyřmi podávacími šneky, procházejícími přední a zadní stěnou.
- Kotle K1 až K10, Severozápadní teplárenská, a.s. Komořany. Palivo je do fluidní vrstvy dávkováno šesti nahazovači.
- Kotel K11, AssiDomän Sepap, Štětí. Palivo je do fluidní vrstvy přiváděno podávacími šneky procházejícími přední a zadní stěnou spalovací komory.
- Kotle K80 a K90, ŠKO-ENERGO, Mladá Boleslav. Palivo se dávkuje šikmým řetězovým vynašečem, dále na příčný řetězový dopravník umístěný podél přední stěny kotle, pak se přes svodky s příslušnými uzavěry dopravuje do horní části každého z obou popelových skluzů fluidního uzavěru.
- Kotle K1 a K2, Energetické centrum Kladno (ECKG). Čtyři podavače dopravují palivo z uhelných sil ke čtyřem podávacím místům uhlí v přední stěně spalovací komory. Do podavačů je vháněn proud studeného primárního vzduchu, který zabráňuje vtékání horkých plynů do podavače a tvoří v něm přetlak.

3. EMISE

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [4], [5], [6] a [7]

Emise jsou znečišťující látky, jež jsou vypouštěny do ovzduší a vznikají při spalování. Hlavními znečišťujícími plynnými látkami jsou SO_2 , NO_x , CO a CO_2 .

- *Emisní limit* udává množství emitované látky za časovou jednotku (mg/m^3). Slouží k vyjádření nejvyššího přípustného množství znečišťující látky vypouštěné do ovzduší. Tento limit je dán vyhláškou, zákonnými předpisy a je povinností ho dodržovat. Vyhláška dělí stacionární zdroje dle příkonu nebo výkonu, druhu paliva a účelu spalování.
- *Emisní faktor* je veličina vznikající spálením jednotkového množství paliva ve spalovacím zařízení, která vyjadřuje střední množství škodliviny.
- *Emisní strop* udává maximální přípustné emisní limity pro všechny zdroje znečišťování na vymezeném území za jeden rok.

Povinnosti provozovatele stacionárního zdroje je vyhodnocení a zjišťování úrovně znečištění měřením. Měření se uskuteční před výstupem do ovzduší v místě, kde již nedochází ke změně koncentrace odpadního plynu.

3.1 Jednorázové měření emisí

Jednorázové měření emisí se realizuje u spalovacích stacionárních zdrojů o jmenovitém tepelném příkonu 50 MW a vyšším, spalující kapalně nebo tuhé palivo, nebo tam kde nejsou specifické emisní limity stanoveny. Provozovatel zajišťuje autorizované osoby, jež provádějí měření. Kromě manuálních metod se samostatnými odběry vzorků lze použít i přístroje určené ke kontinuálnímu měření emisí. Měřicí přístroje musí splňovat podmínku určení koncentrace znečišťujících látek v rozsahu od 10 % do 200 % specifického emisního limitu.

Měření musí být provedeno při uvádění stacionárního zdroje do provozu, dále pak jednou ročně, nebo při každé změně paliva a po každém zásahu do konstrukce či vybavení kotle. Roční frekvence platí také u stacionárních spalovacích zdrojů, jejichž celkový jmenovitý tepelný příkon přesahuje 50 MW. U ostatních stacionárních spalovacích zdrojů postačuje jedno měření za tři kalendářní roky.

Četnost a dobu měření ukládá vyhláška. Za dodržení emisní limit považujeme tehdy, nepřikročil-li jednotlivé průměrné výsledky měření koncentrace znečišťující látky 120 % emisního limitu a průměrná hodnota, která je menší než emisní limit.

3.2 Kontinuální měření emisí

Kontinuální měření emisí slouží k vyjádření tuhých znečišťujících látek (TZL), NO_x (NO₂), SO₂ a CO u spalovacích stacionárních zdrojů o jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 50 MW. Měření je nutno provést také u stacionárního zdroje, kde překročí roční hmotnostní tok maximální projektovaný výkon zdroje a také při překročení emisního limitu vyjádřené hmotnostní koncentrací znečišťující látky viz tabulka (3.1). Kontinuální měření emisí můžeme nahradit jednorázovým měřením u stacionárního spalovacího zdroje, ve kterém dochází pouze ke spalování zemního plynu do jmenovitého tepelného příkonu 100 MW.

Název látky	Hmotnostní koncentrace [tun/rok]
NO _x (vyjádřeny jako NO ₂)	200
SO ₂	1000
CO	50
TZL	200
plynné anorganické sloučeniny chloru (vyjádřeny jako chlor)	4
plynné anorganické sloučeniny fluoru (vyjádřeny jako fluor)	2
těkavé organické látky (vyjádřeny jako organický uhlík)	10
sulfan	1

Tabulka 3.1: Specifický emisní limit [5]

U měření, kalibrací a ověřování správnosti výsledků musí být dodržena reprezentativnost a průkaznost. Daná metoda měření a odběr analyzovaného plynu musí co nejpřesněji odrážet skutečnost dané míry znečištění. U přístrojů pro měření musí být splněna podmínka stanovení hmotnostní koncentrace znečišťující látky v rozsahu od 10 % do 250 % měřeného emisního limitu.

Emisní limit pokládáme za dodrženy tehdy, jsou-li měsíční průměrné hodnoty pod danou hodnotou specifického emisního limitu, dále průměrná denní hodnota nepřesáhne 110 % hodnoty emisního limitu nebo 150 % hodnoty emisního limitu u stacionárních spalovacích zdrojů s maximálním jmenovitým tepelným příkonem 50 MW spalujících černé uhlí a u půlhodinové průměrné hodnoty do 200 % hodnoty emisního limitu.

Kontrolovat správnost údajů kontinuálního měření může učinit pouze autorizovaná osoba jedenkrát ročně jednorázovým měřením.

Kromě měření úrovně znečištění je povinností kontinuálně měřit vztažné veličiny, stavové veličiny a provozní parametry procesu u spalování odpadu. Jedná se o tlak spalin, teplotu, vlhkost a teplotu odebíraného vyčištěného měřeného plynu. Má-li odebíraný vzorek analyzovaného plynu před analýzou odlučovač vlhkosti, není požadováno kontinuální měření obsahu vodních pár.

3.3 Vlastnosti škodlivin

Nejzávažnější škodlivé látky obsaženy ve spalínách, které působí na životní prostředí a ovlivňují svými negativními účinky živou i neživou přírodu, jsou uvedeny v tabulce (3.2).

Název a označení	Vznik	Vlastnosti	Zdravotní účinky	Vliv na životní prostředí
Oxid uhelnatý CO	při nedokonalého spalování uhlíku	bezbarvý a bez zápachu	prudce jedovatý, zamezuje přenosu kyslíku v krvi	při reakci s jinými látkami způsobuje škodlivý přízemní ozon
Oxid uhličitý CO₂	při spalování (fosilní a organická paliva)	bezbarvý, nehořlavý, lehce kyselý	ztěžuje dýchání	skleníkový plyn
Oxidy dusíku NO_x	NO z organicky vázaného a vzdušného dusíku	červenohnědý	nejsou známy	spolu s dalšími plyny způsobuje smog
Oxid dusnatý NO	NO ₂ z NO při spojení s kyslíkem u nízkých teplot	červenohnědý	dráždí sliznici	kyselé deště
Oxid dusičitý NO ₂	N ₂ O při spalovacích procesech (detailnější vznik zatím neznám)	bezbarvý, nehořlavý	anestetický účinek (rajský plyn), při vysoké koncentraci zástava dýchání	skleníkový plyn
Oxid dusný N ₂ O				
Oxid siřičitý SO₂	při spalování paliv s obsahem síry	bezbarvý, štiplavý	toxický, dráždí horní dýchací cesty	kyselé deště

Tabulka 3.2: Vybrané škodliviny a jejich vlastnosti

3.4 Výpočet hmotového toku emisí

Příklad výpočtu hmotnostní koncentrace znečišťujících látek u jednorázového měření uskutečněného manuální metodou závisí na metodě určení. U kontinuálního měření dochází k vyjádření objemového zlomku dané složky analyzovaného plynu. Pro přesnost výsledku je nutno znát vztažné podmínky, které se liší, je-li odpadní plyn vlhký nebo suchý, a také dle referenčního obsahu O_2 .

- *Hmotnostní koncentrace* reprezentuje hmotnost znečišťující látky na objem nosného plynu, odváděné ze zdroje:

- 1) Výpočet rovnice koncentrace za normálního stavu (vlhký plyn)

$$E_n = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101,32}{101,32 \cdot \Delta p} \cdot E_p \quad [\text{ppm, mg.m}^{-3}_N] \quad (3.1)$$

- 2) Výpočet rovnice koncentrace za normálního stavu (suchý plyn)

$$E_n^s = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101,32}{101,32 \cdot \Delta p} \cdot \frac{100}{100-w} \cdot E_p \quad [\text{ppm, mg.m}^{-3}_N] \quad (3.2)$$

- 3) Výpočet rovnice koncentrace za normálního stavu u referenčního obsahu O_2 (suchý plyn)

$$E_n^r = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101,32}{101,32 \cdot \Delta p} \cdot \frac{100}{100-w} \cdot \frac{21-O_2^r}{21-O_2^m} \cdot E_p \quad [\text{ppm, mg.m}^{-3}_N] \quad (3.3)$$

kde: E_n ... koncentrace za normálního stavu (vlhký plyn) [ppm, mg.m⁻³_N]

E_n^s ... koncentrace za normálního stavu (suchý plyn) [ppm, mg.m⁻³_N]

E_n^r ... koncentrace za normálního stavu (suchý plyn)

s referenčním obsahem kyslíku [ppm, mg.m⁻³_N]

E_p ... koncentrace za daných provozních podmínek [ppm, mg.m⁻³_N]

t teplota nosného plynu za daných provozních podmínek [° C]

Δp ... tlaková difference oproti normálnímu tlaku za daných

provozních podmínek [Pa]

w obsah vody [%]

O_2^r ... referenční obsah kyslíku ve spalínách [%]

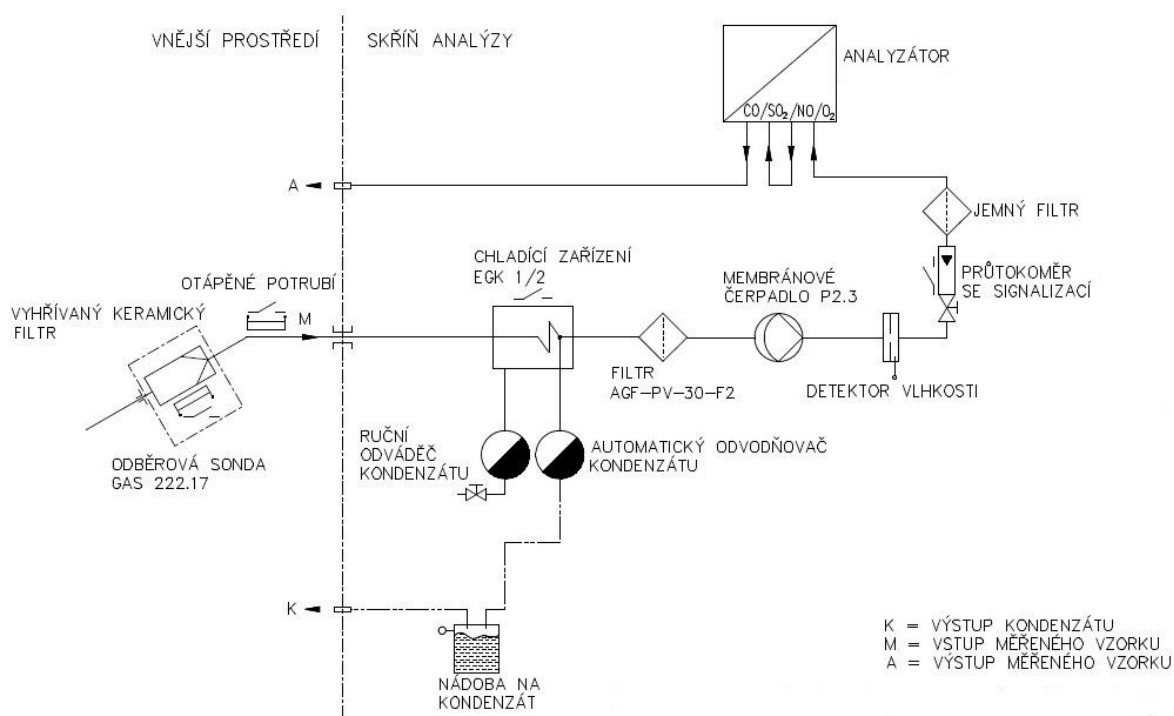
O_2^m ... změřený obsah kyslíku ve spalínách [%]

- *Hmotnostní tok* reprezentuje hmotnost znečišťující látky za jednotku času, odváděné ze zdroje.

3.5 Provozní měření emisí K 11

Monitorovací a měřicí systém se skládá z měření O_2 , TZL a plynných složek spalín viz obrázek (3.1). K řízení spalovacího procesu se analyzuje O_2 a CO. Pro emisní monitoring měříme plynné složky spalín NO_x , SO_2 , CO a TZL.

- *Měření emisí NO_x , SO_2 , CO a O_2* : umístěné za EO se uskutečňuje za pomoci odběrového zařízení a fotometrického analyzátoru s infračervenou absorpcí. Měření je popsáno v kapitole 3.5.1 typ EL-3020.
- *Měření O_2* : umístěné před LUVO je prováděno neextraktivní metodou pomocí zirkoniové sondy, která patří do kategorie elektrochemických analyzátorů popsaných v následující kapitole 3.5.2.
- *Měření prachu (TZL)*: je umístěné za EO a provádí se pomocí optického monitoringu koncentrace prachu typ DURAG 280-10 viz kapitola 3.5.3.



Obr. 3.1: Schéma přístrojů pro kontinuální měření emisí

3.5.1 Fotometrické analyzátoři

Fotometrické samočinné analyzátoři pracují na principu elektromagnetických ultrafialových záření při viditelných a infračervených oblastech vlnových délek. Záření je ovlivňováno absorpcí, rozptylem, lomem a také otáčením roviny polarizačního záření.

Absorpční analyzátoři měří absorpci záření, která prostupuje analyzovaným plynem. Intenzita záření se snižuje průchodem přes vrstvu látky. Lambertův-Beerův zákon u monochromatického záření udává intenzitu zeslabení, kterou lze vyjádřit rovnicí (3.4):

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\varepsilon c l} \quad [\text{W}] \quad (3.4)$$

kde: φ ... světelný tok vystupující z látky [W]

φ_0 ... světelný tok vstupující do vrstvy látky [W]

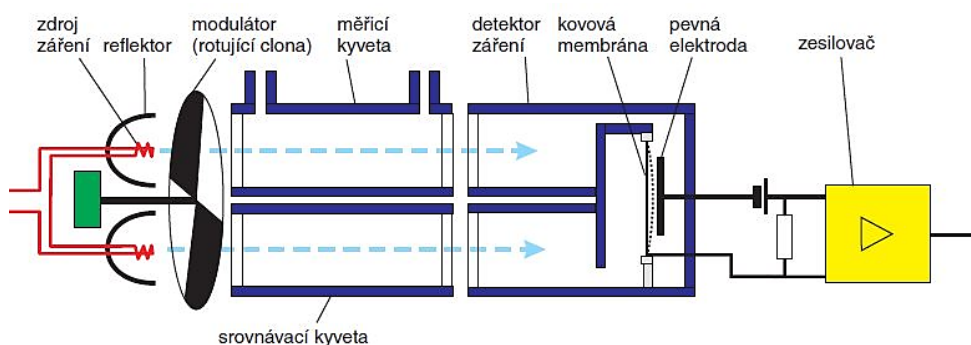
e ... základ přirozeného logaritmu [1]

ε ... molární absorpční (extinkční) koeficient dané látky [l.mol⁻¹.cm⁻¹]

c ... koncentrace absorbující složky [l.mol⁻¹]

l ... tloušťka vrstvy absorbujícího prostředí podél paprsku. [cm]

Analyzátoři kouřových plynů pro měření obsahu hlavních plynných znečišťujících složek používají častokrát metodu infračervené absorpční spektrometrie označované jako NDIR viz obrázek (3.2). Pracují s absorpcí v infračervené oblasti od 0,7 do 10⁴ μm elektromagnetického záření. Rozhraní mezi viditelnou infračervenou oblastí je 0,7 μm, nad 10⁴ μm bývá už oblast mikrovln.



Obr. 3.2: Infračervený analyzátor URAS [7]

3.5.2 Elektrochemické analyzátoři

Elektrochemické analyzátoři fungují na principu měření výstupního napětí, jež vzniká mezi elektrodami. Pevný elektrolyt je tvořen oxidem zirkoničitým. Nejdůležitější částí analyzátoru je vrstva elektrolytu s platinovými elektrodami. Elektrody propouští plyn a bývají usazeny na protilehlých stranách elektrolytu. Srovnávací elektroda je umístěná na straně přívodu srovnávacího plynu. Měřicí elektroda se nachází na straně přívodu analyzovaného plynu.

Faradayův vztah nám definuje vzniklé napětí mezi elektrodami

$$U_e = \frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln \frac{p_{1(O_2)}}{p_{2(O_2)}} \quad [\text{V}] \quad (3.5)$$

kde: U_e elektromotorické napětí mezi elektrodami [V]

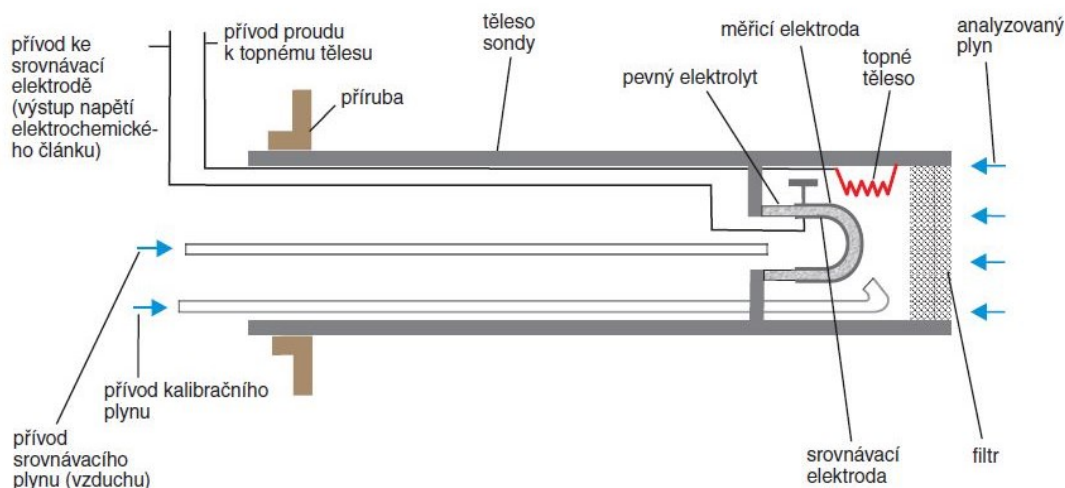
F Faradayaova konstanta (náboj) [C.mol⁻¹]

R plynová konstanta [J.mol⁻¹.K⁻¹]

T termodynamická teplota [K]

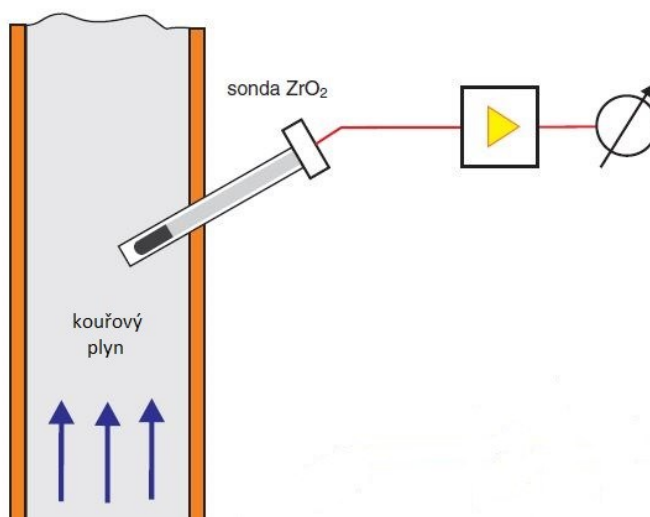
\ln přirozený logaritmus [1]

$p_{1,2(O_2)}$... parciální tlak O₂ u elektrody 1 a 2. [kPa]



Obr. 3.3: Schéma sondy s elektrochemickým článkem [7]

Uspořádání sondy dle obrázku (3.3) s elektrochemickým článkem se používá k měření koncentrace O_2 v analyzovaném plynu. Elektrochemický článek umístěný na konci sondy je zasunutý rovnou v kouřovodu viz obrázek (3.4), kde se analyzuje skutečné složení plynné složky. Nejprve analyzovaný plyn prochází filtrem. Čidlo s elektrodami a keramikou je vyhříváno na teplotu $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ pomocí topného tělesa. Vzduch je použit jako srovnávací plyn. Přívod kalibračního plynu se využívá ke kontrole funkčnosti snímače. Vysoká teplota může ovlivnit přesnost měření, v němž dochází k oxidaci nespálených složek směsi na platinovém povrchu měřicí elektrody.



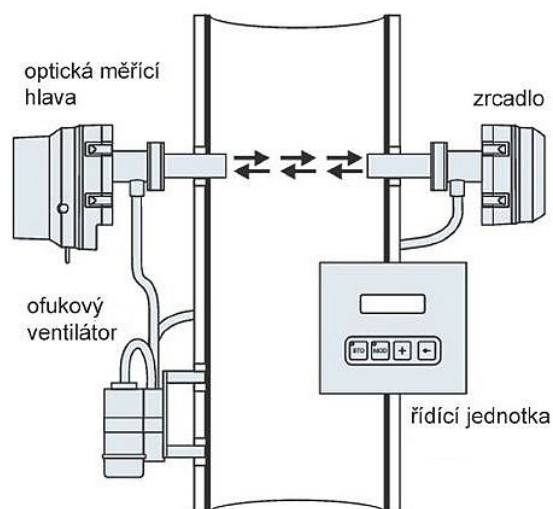
Obr. 3.4: Instalace analyzátoru u neextraktivní metody [7]

3.5.3 Optický analyzátor tuhých částic

Optický analyzátor viz obrázek (3.5) pracuje na principu dvojité propustnosti. Světelný paprsek proudí měřicím místem dvakrát. V měřicí hlavě dochází k vyhodnocování úbytku světla. Řídící jednotka nám zobrazuje výsledné měřicí hodnoty.

Měřicí systém dle obrázku (3.5) se skládá z:

- montážní příruby,
- měřicí hlavy,
- reflektoru,
- vyhodnocovací jednotky,
- čistící vzduchové jednotky.



Obr. 3.5: Optický monitor koncentrace prachu [8]

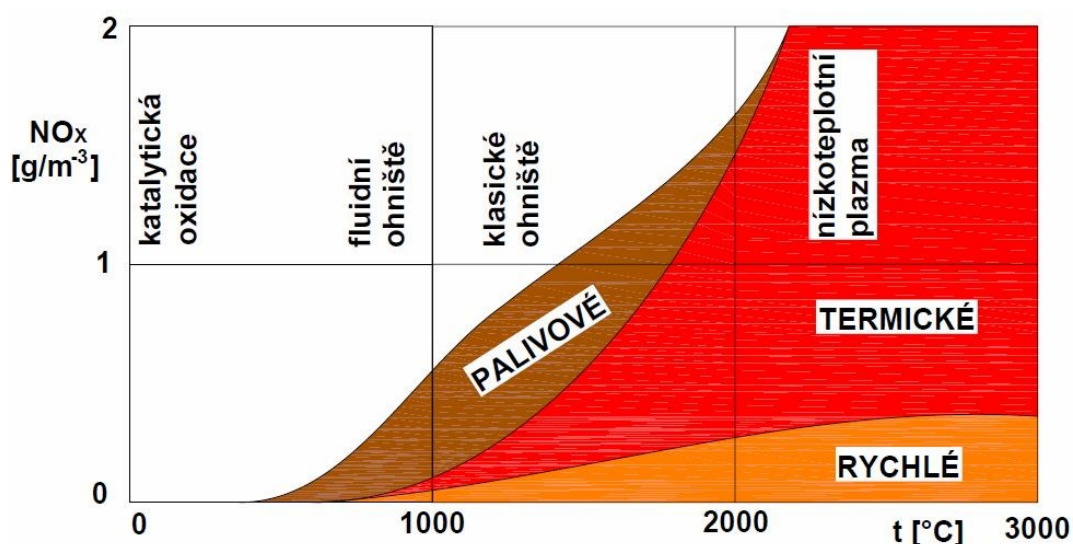
4. OXIDY DUSÍKU

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [9], [10] a [11]

Oxidy dusíku označujeme často jako NO_x . Řadíme mezi ně nejčastěji oxidy dusíku NO 90 - 95 [%] podílu a také oxid dusičitý NO_2 5 - 10 [%] podílu. V malém množství se vyskytují další oxidy N_2O , N_2O_3 a N_2O_5 . Oxidy dusíku řadíme mezi škodlivé látky, jenž vznikají při spalování paliv a dostávají se spaliny do vzduchu. Z komína vypuštěné spaliny se ochladí v kouřové vlečce, kde dochází k přeměně z NO na NO_2 . Tento oxid dusičitý s vodní parou tvoří HNO_3 a HNO , které mají za následek vznik kyselých dešťů.

4.1 Vznik emisí NO_x

Máme tři hlavní původy vzniku emisí oxidu dusíku viz obrázek (4.1) při spalování fosilních paliv: palivové, termické a promptní.



Obr. 4.1: Tvorba NO_x při spalování v závislosti na teplotě [9]

- 1) *Palivové NO_x* : tvorbu ovlivňují dusíkaté sloučeniny. Vzniká oxidací chemicky vázaného dusíku v palivu, opatřením ke snížení této tvorby je snížení koncentrace kyslíku v oblasti plamene.
- 2) *Termické NO_x* : tvorbu ovlivňuje vysoká teplota a čas trvání reakce. Opatřením ke snížení této tvorby je zmenšení sumární teplotní úrovně, omezení místních teplotních maxim a zmenšení koncentrace kyslíku v oblasti horní hranice.
- 3) *Promptní (rychlé) NO_x* : velmi rychlá reakce, tvorbu ovlivňuje spalování uhlovodíků v oblasti plamene. Vzniká přeměnou molekulárního dusíku v oblasti plamene bohatého na palivo. Opatření ke snížení této tvorby je závislé na přebytku vzduchu.

4.2 *Snížování emisí NO_x*

V důsledku dodržení přísných emisních limitů a snížení ekologické zátěže v podobě poklesu emise oxidu dusíku vede provozovatele k instalaci opatření. Tato opatření rozdělujeme podle metod na primární a sekundární.

4.2.1 *Primární metoda*

Primární metoda má zamezit tvorbě nebo snížit tvorbu NO_x. Výhodou této metody je možnost snížení NO_x až o 40 %, za relativně nízkých nákladů.

- *Nízký obsah dusíku v surovém palivu* – je dán výběrem paliva různého původu a různých dodavatelů.
- *Ovlivnění průběhu zapálení* – pomocí rozdělení prášku do výšky ohniště a změnou jemnosti mletí.
- *Snížení nejvyšší spalovací teploty* – snížíme volbou paliva s nižší výhřevností, snížením teploty spalovacího vzduchu, recirkulací spalin, chlazením plamene vlivem intenzifikace přenosu tepla, sjednocením teplot v průřezu ohniště.
- *Snížení koncentrace O₂* – tuto koncentraci ovlivníme instalací recirkulaci spalin, snížením přebytku vzduchu, postupným přívodem spalovacího vzduchu a paliva.
- *Zkrácení doby setrvání v místě výskytu vysokých teplot* – ovlivníme zejména konstrukcí a počtem hořáků.
- *Zpomalené mísení paliva se spalovacím vzduchem* – ovlivňuje konstrukce hořáků, jejich nasměrování v ohništi a vertikální rozčlenění. Dále změnou relativní rychlosti primární směsi a sekundárního vzduchu.
- *Recirkulace spalin* – instalace recirkulačního ventilátoru, který vrací část spalin (10–20 %) zpět do spalovacího procesu. Tato instalace snižuje obsah kyslíku a následkem ochlazení plamene bude omezena přeměna dusíku vázaného v palivu a také vytváření tepelných NO_x.

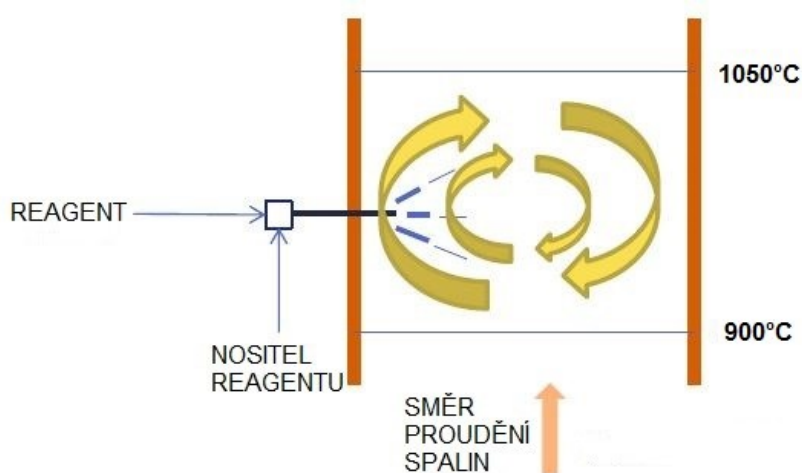
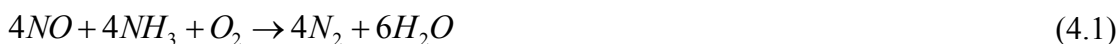
4.2.2 *Sekundární metoda*

Sekundární metoda má odstranit nebo snížit vzniklých NO_x ze spalin.

- *Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)* – tato metoda spočívá v konverzi NO_x na N₂ a H₂O pomocí vstřikování reagentu nejčastěji v podobě čpavku nebo močoviny, viz schéma (4.2). Selektivní reakce nereaguje s kyslíkem ze spalin, ale pouze se samotnými reagenty. Pro správnou účinnost je nutné reagent vstřikovat v úzkém teplotním okně v rozmezí 900–1050 °C, neboli správným umístěným trysek ve spalovací komoře. Při nižších teplotách oxidy dusíku nereagují s radikálem vlivem nízké reakční rychlosti, následkem toho dochází k čpavkovému skluzu. Při vysokých teplotách radikál reaguje přednostně s kyslíkem, což znamená zvýšení koncentrace oxidu dusíku ve spalinách. Výhodou této metody je vysoká redukce NO_x (snížení o 30-50 %) a ve srovnání

s jinými metodami bývá investičně levnější. Nevýhodou je vysoká citlivost na teplotu, rovnoměrné rozložení reakčního činidla a dodržení limitů NH_3 .

Chemická reakce při selektivní nekatalytické redukci dle rovnice (4.1) a (4.2).

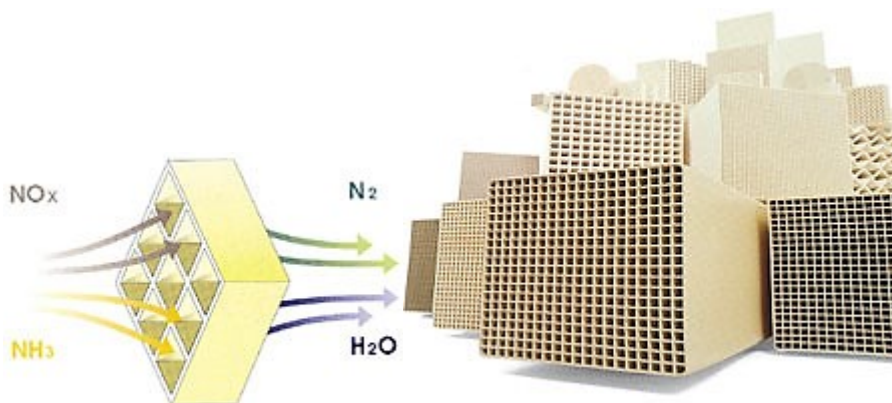


Obr. 4.2: Schéma vstřikování reagentu [12]

- *Selektivní katalytická redukce (SCR)* – je na rozdíl od předchozí metody doplněna o katalyzátor a probíhá při nižších teplotách (170–510°C). Katalyzátory dělíme do tří typů. První typ blokový s vyliisovanými otvory, nosičem je nejčastěji TiO_2 nebo Al_2O_3 . Katalyticky aktivními složkami jsou V_2O_5 , WO_3 a MoO_3 . Druhý je typ deskový s kovovou mříží a naneseným vlastním katalyzátorem. Třetí typ katalyzátoru je typ paletizovaný, používaný v nepohyblivé vrstvě i ve fluidním loži, používá většinou aktivní uhlí a zeolity. Efektivita selektivní katalytické reakce je závislá zejména na objemové rychlosti spalin a dále na teplotě spalin, vlastnostech katalyzátoru, stechiometrii $\text{Sr} = \text{NH}_3$ v poměru k NO_x . A dále závisí na koncentraci O_2 a na rozdílu koncového oxidu dusíku před a za katalyzátorem. Výhodou je velmi vysoká redukce NO_x (snížení o 80-90 %). Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady a zvýšená koncentrace NH_3 v popílku.

Chemická reakce při selektivní katalytické redukci dle rovnice (4.3) a (4.4).

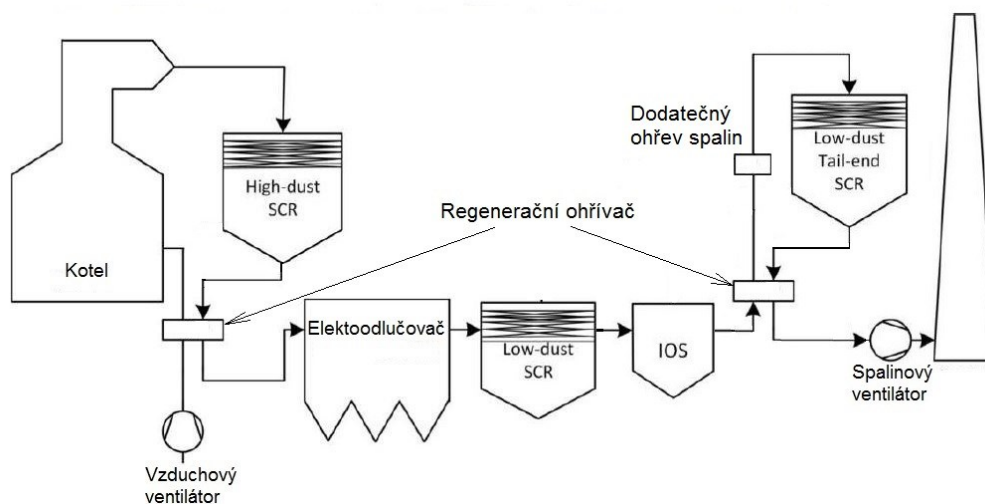




Obr. 4.3: Katalytická vložka

Umístění katalyzátoru SCR dělíme dle obrázku (4.3) na několik variant:

- High-dust SCR – redukce NO_x spalin před elektrostatickým odlučovačem, spaliny jsou neodprášené.
- Low-dust SCR – redukce NO_x spalin za elektrostatickým odlučovačem, spaliny jsou odprášené.
- Low-dust Tail-end SCR - de NO_x spalin za elektrostatickým odlučovačem a odsířením.



Obr. 4.4: Technologické schéma umístění katalyzátoru SCR

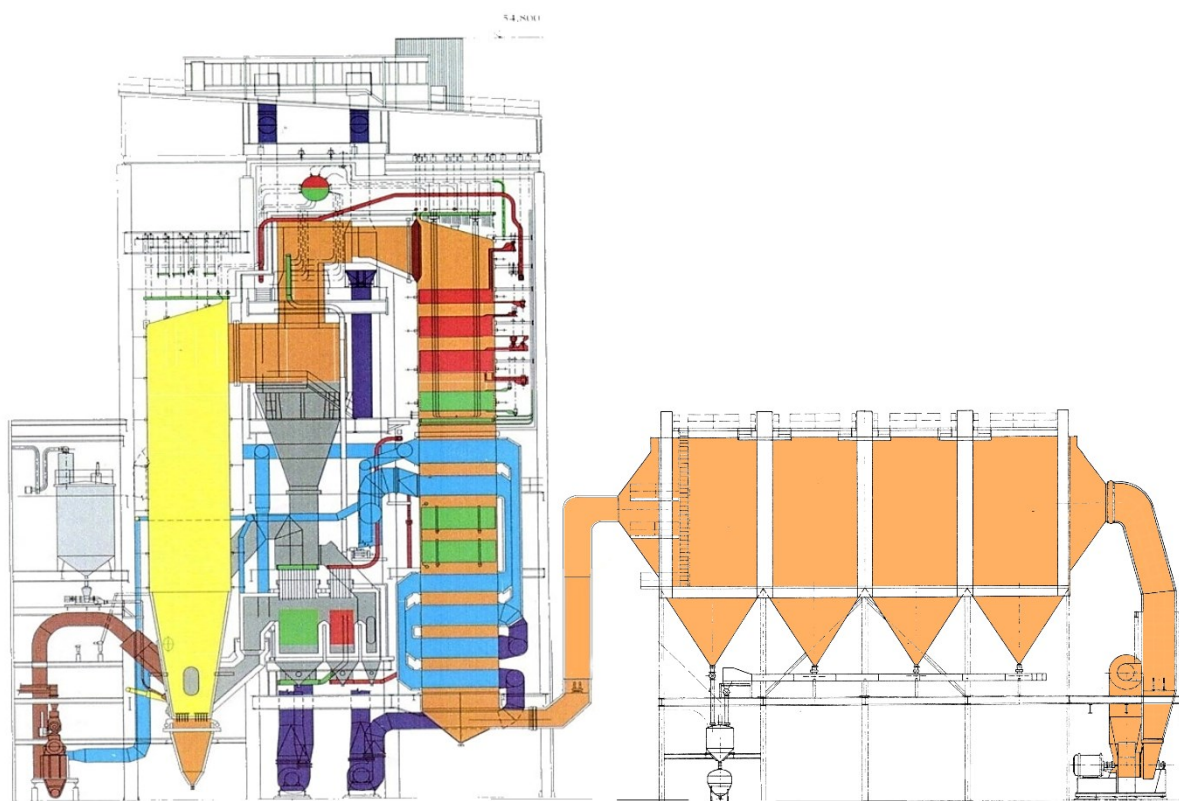
- *Simultánní metody* – tato metoda řeší kombinací odstranění NO_x a zároveň SO_x ze spalin. Jedná se o aplikaci suché nebo mokré vypírky. Při použití suché vypírky pomocí katalyzátoru ve formě aktivního koksu s následnou denitrifikací NH_3 dochází k redukci NO . Mokrou vypírku dělíme na oxidační, která používá vhodnou sloučeninu pro absorpci zoxidovaného NO na NO_2 a absorpční, která používá vhodnou tekutinu na odstranění NO pro následnou redukci na dusík.

5. FLUIDNÍ KOTEL K11

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [13]

Hlavní činností společnosti ENERGETIKY TŘINEC, a.s. je výroba elektrické energie, technologické páry, horké vody, stlačeného a dmýchaného vzduchu pro vysoké pece. Energetika vyrábí vysokotlakou páru na šesti parních kotlích. Tři parní kotle průtočné a jeden bubnový spalující hutní a zemní plyn. Dále tři fluidní kotle spalující černé a hnědé uhlí, biomasu, vysokopecní plyn a zemní plyn. Celkový instalovaný tepelný výkon je 583 MWt.

Cílem praktické části této diplomové práce je navržení opatření pro snížení emisí oxidu dusíku na kotli K11 ENERGETIKY TŘINEC (viz obr. 5.1). Jedná se o navržení úpravy dopravy trasy paliva do kotle. Dále bude na kotli navržena recirkulace spalín.



Obr. 5.1: Fluidní kotel K11 ENERGETIKA TŘINEC, a.s.

5.1 Technický popis kotle K11

Fluidní kotel K11 s cirkulující fluidní vrstvou je v provozu od roku 1995. Kotel je řešen jako sálavý s přirozenou cirkulací parovodní směsi. Parametry kotle K11 jsou uvedeny v tabulce (5.1). Má dvoutahovou konstrukci, jeden buben a dva cyklony umístěné mezi prvním a druhým tahem. Cyklony slouží k oddělení fluidizace schopných částic, zejména částic popele a nedopáleného uhlí. I. tah tvoří fluidní spalovací komora s fluidním roštem pro přívod primárního vzduchu. V nejvyšší části II. tahu je umístěn 2. a 3. přehřívač

a také EKO 2. Ve spodní části je umístěno LUVO 1 a 2 a EKO 1. V chladiči fluidní vrstvy je nainstalován 1. přehříváč a část výparníku.

Vzduch pro spalování zajišťují dva ventilátory. Primárním ventilátorem je dodáván vzduch přes trubkové LUVO pod fluidní rošt a pro čtyři dýzy VP plynu. Sekundárním ventilátorem je dodáván vzduch přes LUVO do dvou drtičů uhlí, kde plní funkci nosného média drceného uhlí. A dále do dvou dýz a dvou zapalovacích hořáků zemního plynu. Spalinový ventilátor slouží k udržení umělého tahu a je umístěn za elektroodlučovači. K zajištění fluidizace je vybaven kotel pěti piškotovými dmýchadly. Dva slouží pro fluidní uzávěry a pro chladič fluidní vrstvy, jeden pro chladič popela.

Pro řízenou cirkulaci popela je kotel vybaven třemi hrotovými uzávěry. Dva jsou umístěny pod cyklony a slouží k odpouštění popela přes chladič popela zpět do spalovací komory. Jeden je určený k odpouštění popele do chladiče popele. Tento uzávěr je umístěn nad dnem spalovací komory.

5.2 Parametry popis kotle K11

Parametry kotle K11 jsou uvedeny v tabulce (5.1).

parametry kotle	hodnoty	jednotky
Jmenovitý výkon kotle	160	[t.h ⁻¹]
Jmenovitý tepelný výkon kotle	126,8	[MW _t]
Jmenovitý tlak přehřáté páry	9,6	[MPa]
Jmenovitá teplota přehřáté páry	540 ± 5	[°C]
Jmenovitá teplota napájecí vody	150	[°C]
Nejvyšší tlak přehřáté páry	12,2	[MPa]
Nejvyšší teplota přehřáté páry	560	[°C]

Tabulka 5.1: Parametry kotle K11 [13]

5.3 Palivo kotle K11

Kotel slouží ke spalování pevných i plyných paliv a také biomasy. Hlavní pevné palivo spalováno v K11 je energetické uhlí, hnědé uhlí a dále proplástek, kaly, granuláty a biomasa. Plyné palivo - zemní plyn, jenž má výhřevnost 35,72 [MJ.m⁻³] využíváme pro stabilizaci a najíždění. Jako doplňkové palivo je spalován vysokopecní plyn s výhřevností 3,0 až 3,15 [MJ.m⁻³]. Vápenec jako aditivum používáme ke snížení SO₂ ve spalinách.

6. BILANCE KOTLE K11

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [15], [16] a [17]

Tepelná bilance parního kotle - slouží k určení účinnosti kotle a množství paliva nezbytného k dosažení potřebného tepelného výkonu.

Způsob výpočtu účinnosti je detailně stanoven v následujících normách:

- Přejímací zkoušky parních kotlů (ČSN 07 0302)
- Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část: Přejímací zkoušky (ČSN EN 12952-15)
- *Přímý způsob*

Přímo se stanovuje účinnost pomocí příkonu (energie z paliva) a výkonu (množství tepla ve vyrobené páře nebo vodě) dle vztahu (6.1).

$$\eta = \frac{Q_{vyr}}{Q_{pr}} \quad [1] \quad (6.1)$$

kde: Q_{vyr} ... energie předaná vodě a páře [kW]

Q_{pr} ... energie přivedená zevně do parního kotle [kW]

U velkých parních kotlů spalujících tuhá paliva norma nedoporučuje použití této metody, jelikož je komplikované stanovit přesnou spotřebu paliva pro určení tepelného příkonu v daném palivu. Ke stanovení účinnosti tedy nelze vždy použít přímou metodu a také takový způsob nemá dostatečnou vypovídající hodnotu, protože v tomto případě chybí informace o podílu jednotlivých ztrát. Z tohoto důvodu bude použita u výpočtu účinnosti nepřímá metoda.

- *Nepřímý způsob*

Nepřímá účinnost se stanovuje pomocí poměrných tepelných ztrát ζ_i dle vztahu (6.2).

$$\eta = 1 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_{sv} - \zeta_k - \zeta_f \quad [1] \quad (6.2)$$

kde: ζ_{CO} ... ztráta nedopalem (ztráta nespálenou hořlavinou ve spalínách)

ζ_C ... ztráta nedopalem (ztráta nespálenou hořlavinou v tuhých zbytcích)

ζ_{sv} ... ztráta sdílením tepla do okolí

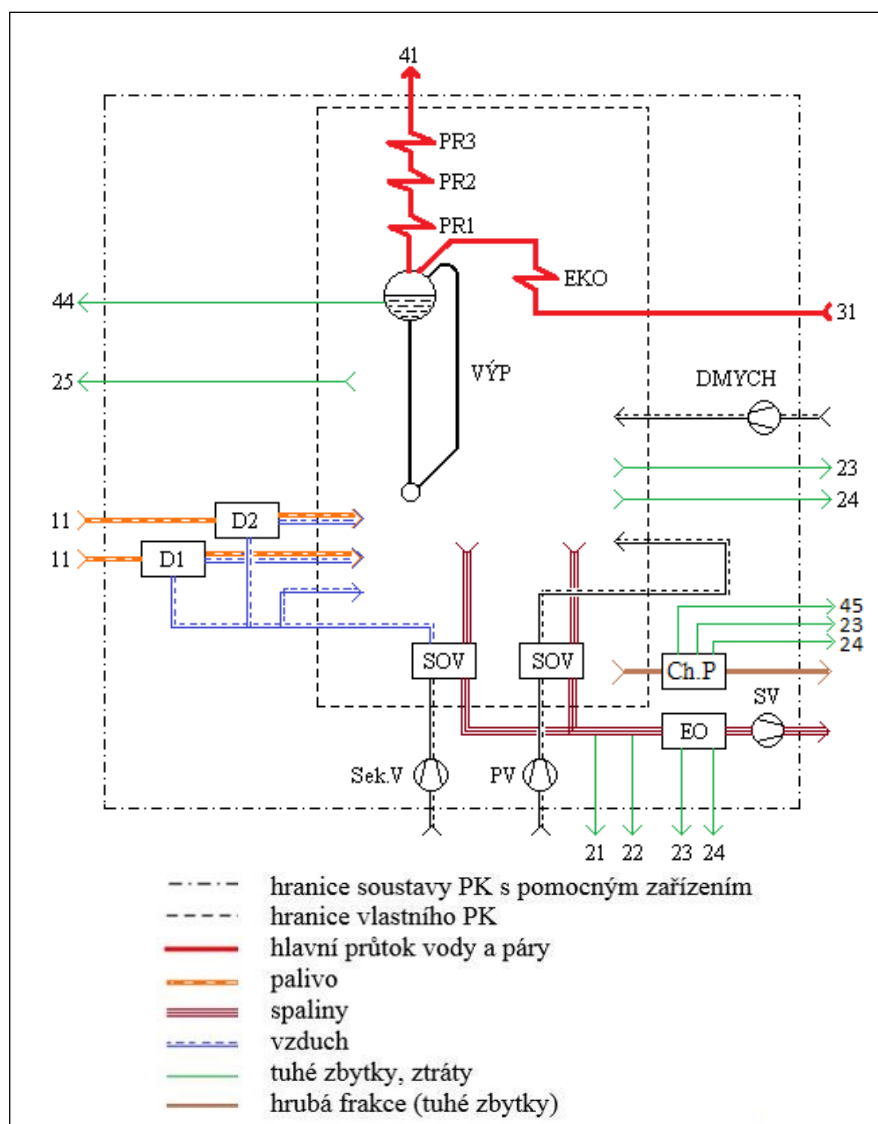
ζ_k ... ztráta komínová (ztráta fyzickým teplem spalin)

ζ_f ... ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Účinnost může být počítaná jako čistá nebo hrubá. Hrubá bez vlivu pomocných zařízení, kde nebude započtena přivedená energie pro elektrický příkon motorů a pohonů. Čistá včetně elektrických příkonů pomocných zařízení, která se přičítají k energii přivedené do kotle. V této práci bude proveden výpočet hrubé účinnosti.

6.1 Energetická bilance kotle

Schématický obr. 6.1 zobrazuje soustavu parního kotle, kde je vyznačená hranice (černá čárkovaná čára). Toto vymezení hranic soustavy je provedeno dle doporučení ČSN. Jednoznačné vymezení soustavy je důležitým prvkem při stanovení účinnosti, v níž je možné měřit veškeré hmotnostní a energetické toky a také vstupující a vystupující veličiny soustavy.



Obr. 6.1: Vymezení hranic parního kotle K11 včetně pomocných zařízení [15]

Toky energií vstupující a vystupující ze soustavy, tvořící energetickou bilanci parního kotle jsou uvedeny v tabulce (6.1).

toky energie	energetická bilance	popis
příkon	11	teplo chemicky vázané v palivu
ztráta	21	ztráta hořlavinou ve spalínách
ztráta	22	ztráta fyzickým teplem spalin
ztráta	23	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
ztráta	24	fyzickým teplem tuhých zbytků
ztráta	25	ztráta sdílením tepla do okolí
vstup pracovní látky kotle	31	teplo v napájecí vodě
výstup pracovní látky kotle	41	teplo v přehřáté páře
výstup pracovní látky kotle	44	teplo v odluhu
výstup pracovní látky chladiče popele	45	teplo v demi vodě

Tabulka 6.1: Toky energií vstupujících a vystupujících ze soustavy. [15]

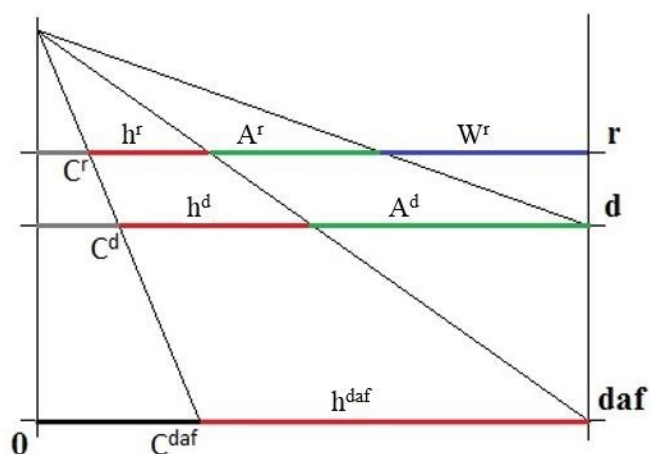
6.2 Palivo

Pro stechiometrický výpočet musíme znát prvkové složení paliva. U tuhých paliv používáme nejčastěji tyto stavy:

r (real) původní (surový) stav = h hořlavina + A popelovina + W voda

d (dry) bezvodný stav = h hořlavina + A popelovina

daf (dry ashfree) stav bez vody a popele = jen h hořlavina



Obr. 6.2: Přepočet mezi stavy [18]

6.2.1 Prvkový rozbor paliva

Výsledky prvkového rozboru paliva, viz tabulka (5.2), provedla laboratoř Enviform a.s. pomocí přístroje pro elementární analýzu. Přístroj Vario MACRO se používá k určení celkového obsahu uhlíku, vodíku, dusíku a síry v pevných vzorcích. Pracuje na principu katalytického spalování vzorku v proudu velmi čistého kyslíku za velmi vysoké teploty. Jako nosný plyn je používáno velmi čisté helium. Po tomto tepelném rozkladu vzorku se plynné složky s obsahem sloučenin C, N, S působením katalyzátorů převádí na CO₂, N₂ a SO₂. Ostatní existující plyny (vodní pára, halogenidy) se odstraní pomocí kondenzace a adsorpce na stříbrnou vatu a oxid fosforečný. Směs čistých vzorkovacích plynů se od sebe separuje na základě specifické desorpce – absorpce na kolonách a dále se určí jejich obsah pomocí tepelně vodivostního detektoru v následujícím sledu N, C, H a S.

Topná zkouška se uskutečňovala 5.2.2016 od 8³⁰ do 10³⁰ hod. při výkonu 127 t/h. Vzorky paliva byly předány laboratoři Enviform a.s. Obdržené hodnoty jsou uvedeny v tabulce (6.2).

druh rozboru	hodnota	
W_t^r	12,6 [%]	0,126 [kg.kg ⁻¹]
A^d	24,0 [%]	0,24 [kg.kg ⁻¹]
Q_i^r	21 830 [kJ.kg ⁻¹]	
C^d	64,1 [%]	0,641 [kg.kg ⁻¹]
H^d	4,07 [%]	0,0407 [kg.kg ⁻¹]
S_t^d	0,76 [%]	0,0076 [kg.kg ⁻¹]
N^d	1,14 [%]	0,0114[kg.kg ⁻¹]

Tabulka 6.2: Prvkový rozbor paliva dodaný laboratoří Enviform, a.s.

- *Výhřevnost paliva*

Přepoččet na výhřevnost hořlaviny se provádí dle vztahu (6.3).

$$Q_i^{daf} = \frac{1}{1 - W_t^r - A^r} \cdot (Q_i^r + 24,5 \cdot W_t^r) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.3)$$

$$Q_i^{daf} = \frac{1}{1 - 0,126 - 0,21} \cdot (21830 + 24,5 \cdot 0,126) = \underline{\underline{32881,16}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- *Obsah popela v surovém palivu*

Přepočet obsahu popela v surovém palivu dle vztahu (6.4).

$$A^r = A^d \cdot (1 - W_t^r) \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.4)$$

$$A^r = 0,24 \cdot (1 - 0,126) = \underline{0,21} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

6.2.2 Přepočet složení paliva

- *Přepočet prvkového složení paliva v hořlavíně*

Přepočet prvkového rozboru sušiny na prvkový rozbor hořlaviny se provádí dle

$$\text{vztahu: } X^{daf} = X^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.5)$$

$$\text{kde: } X^{daf} \dots C^{daf}, H^{daf}, S^{daf} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$X^d \dots C^d, H^d, S^d \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$A^d \dots \text{obsah popela v sušině} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Přepočet obsahu uhlíku v hořlavíně:

$$C^{daf} = C^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.6)$$

$$C^{daf} = 0,641 \cdot \frac{1}{1 - 0,24} = \underline{0,843} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Přepočet obsahu vodíku v hořlavíně:

$$H^{daf} = H^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.7)$$

$$H^{daf} = 0,0407 \cdot \frac{1}{1 - 0,24} = \underline{0,054} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Přepočet obsahu síry v hořlavíně:

$$S^{daf} = S^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.8)$$

$$S^{daf} = 0,0076 \cdot \frac{1}{1 - 0,24} = \underline{0,01} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Přepočet obsahu dusíku v hořlavíně:

$$N^{daf} = N^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.9)$$

$$N^{daf} = 0,0114 \cdot \frac{1}{1 - 0,24} = \underline{0,015} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Zbývá dopočítat obsah kyslíku v hořlavíně dle vztahu (6.10)

Vždy musí platit, že součet všech prvků se musí rovnat 100 %.

$$C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + N^{daf} + O^{daf} = 1 \quad [1] \quad (6.10)$$

$$O^{daf} = 1 - C^{daf} - H^{daf} - S^{daf} - N^{daf} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$O^{daf} = 1 - 0,843 - 0,054 - 0,01 - 0,015 = \underline{0,078} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- *Přepočet prvkového složení původního paliva*

Prvkové složení hořlaviny přepočteno na prvkové složení surového paliva dle

$$\text{vzorce: } X^r = X^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.11)$$

$$\text{kde: } X^{daf} \dots C^{daf}, H^{daf}, S^{daf} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$W_t^r \dots \text{obsah vody v surovém (původním) palivu} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$X^r \dots C^r, H^r, S^r \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$A^r \dots \text{obsah popela v surovém (původním) palivu} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Přepočet obsahu uhlíku v surovém palivu:

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r)$$

$$C^r = 0,843 \cdot (1 - 0,126 - 0,21) = \underline{0,56}$$

Přepočet obsahu vodíku v surovém palivu:

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r)$$

$$H^r = 0,054 \cdot (1 - 0,126 - 0,21) = \underline{0,036}$$

Přepočet obsahu síry v surovém palivu:

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r)$$

$$S^r = 0,01 \cdot (1 - 0,126 - 0,21) = \underline{0,006}$$

Přepočet obsahu dusíku v surovém palivu:

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r)$$

$$N^r = 0,015 \cdot (1 - 0,126 - 0,21) = \underline{0,01}$$

Přepočet obsahu kyslíku v surovém palivu:

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r)$$

$$O^r = 0,078 \cdot (1 - 0,126 - 0,21) = \underline{0,052}$$

$$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.12)$$

- *Kontrola výpočtu*

Kontrola výpočtů prvkového složení surového paliva dle vztahu (6.13)

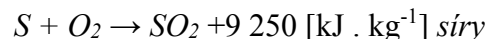
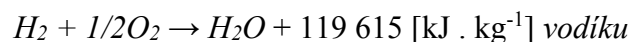
Vždy musí platit, že součet všech prvků se musí rovnat 100 %.

$$C^r + H^r + S^r + N^r + O^r + A^r + W_t^r = 1 \quad [1] \quad (6.13)$$

$$0,56 + 0,036 + 0,006 + 0,01 + 0,052 + 0,21 + 0,126 = 1 \quad [1]$$

6.3 Výpočet stechiometrického objemu spalovacího vzduchu a spalín

U stechiometrického spalování je veškerý kyslík spotřebován ke vzniku produktu hoření. Základem níže uvedených objemových výpočtů jsou následující exotermní chemické rovnice: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 33\,828,5 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$ *uhlíku*



Vypočtené objemy jsou vyjádřeny v m^3_N na 1 kg paliva při normálních podmínkách.

Normální podmínky: $t_N = 0$ [°C]
 $p_N = 101,325$ [kPa]

- Výpočet stechiometrického objemu spalovacího vzduchu a vzniklých spalín

Výpočet minimálního množství suchého vzduchu k dokonalému spálení 1kg paliva dle vztahu (6.14).

$$V_{vs \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left(\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right) \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.14)$$

$$V_{vs \min} = \frac{22,39}{0,2095} \left(\frac{0,56}{12,011} + \frac{0,036}{4,032} + \frac{0,006}{32,066} - \frac{0,052}{32,00} \right) = \underline{5,783} \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočet minimálního množství suchých spalín, které vznikne dokonalým spálením 1kg paliva dle vztahu (6.15).

$$V_{ss \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{vs \min} \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.15)$$

$$V_{ss \min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,56 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,006 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,01 + 0,7905 \cdot 5,783$$

$$V_{ss \min} = \underline{5,621} \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Určení součinitele zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti dle vztahu:

$$v = 1 + \frac{\varphi_v \cdot p''}{p_b - \varphi_v \cdot p''} \quad [1] \quad (6.16)$$

kde: φ_v ... relativní vlhkost vzduchu [1]

p'' ... tlak vodní páry na mezi sytosti při teplotě $t = 20 \text{ °C}$ [Pa]

p_b ... tlak barometrický [Pa]

$$v = 1 + \frac{0,417 \cdot 0,0023}{0,0984 - 0,417 \cdot 0,0023} = \underline{1,01} \quad [1]$$

Výpočet minimálního množství vody ve spalínách dle vztahu (6.17).

$$V_{s_{H_2O} \min} = 11,111 \cdot H^r + 1,243 \cdot W_t^r + (v-1) \cdot V_{vs \min} \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.17)$$

$$V_{s_{H_2O} \min} = 11,111 \cdot 0,036 + 1,243 \cdot 0,126 + (1,01-1) \cdot 5,621 = \underline{0,613} \quad [\text{m}^3_N \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu CO_2 ve vzduchu vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.18).

$$V_{v_{\text{CO}_2}} = 0,0003 \cdot V_{v_{\text{s min}}} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.18)$$

$$V_{v_{\text{CO}_2}} = 0,0003 \cdot 5,783 = \underline{0,002} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu N_2 ve vzduchu vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.19).

$$V_{v_{\text{N}_2}} = 0,7809 \cdot V_{v_{\text{s min}}} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.19)$$

$$V_{v_{\text{N}_2}} = 0,7809 \cdot 5,783 = \underline{4,516} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu Ar ve vzduchu vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.20).

$$V_{v_{\text{Ar}}} = 0,0093 \cdot V_{v_{\text{s min}}} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.20)$$

$$V_{v_{\text{Ar}}} = 0,0093 \cdot 5,783 = \underline{0,054} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu CO_2 ve spalinách vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.21).

$$V_{s_{\text{CO}_2}} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.21)$$

$$V_{s_{\text{CO}_2}} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,56 = \underline{1,038} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu SO_2 ve spalinách vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.22).

$$V_{s_{\text{SO}_2}} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.22)$$

$$V_{s_{\text{SO}_2}} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,006 = \underline{0,004} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu N_2 ve spalinách vzduchu vypočteme při dokonalém spalování dle vztahu (6.23).

$$V_{s_{\text{N}_2}} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.23)$$

$$V_{s_{\text{N}_2}} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,01 = \underline{0,008} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu CO ve spalinách vypočteme při nedokonalém spalování dle vztahu (6.24).

$$V_{sco} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.24)$$

$$V_{sco} = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,56 = \underline{1,045} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

Vyjádření stechiometrického objemu O₂ ve spalinách vypočteme při nedokonalém spalování dle vztahu (6.25).

$$V_{O_2(c)} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.25)$$

$$V_{O_2(c)} = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,56 = \underline{1,044} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

6.4 Parametry spalin při nedokonalém spalování

Při stechiometrických poměrech nedochází k vyhoření všech hořlavých složek paliva. Ke spálení všech hořlavých složek paliva potřebujeme přivést do kotle větší než teoretické množství vzduchu. Tento skutečný objem vzduchu vyjádříme jako součinitel přebytku vzduchu. Nicméně ani při tomto zvětšení objemu spalovacího vzduchu nedojde k ideálnímu vyhoření paliva, proto norma uvádí:

- část uhlíku, který neshoří a odchází společně z kotle s tuhými zbytky ve formě ložového a úletového popele vyjádříme jako podíl **b** dle vztahu (6.26).

V tabulce (6.3) je uveden hmotnostní podíl uhlíku, neboli nedopal v tuhých zbytcích, který byl dodán laboratoří ENERGETIKY TŘINEC, a.s. a dále poměr popelové bilance.

ložový popel	úletový popel
$C_L = 0,0006 [kg \cdot kg^{-1}]$	$C_U = 0,0779 [kg \cdot kg^{-1}]$
$X_L = 0,4 [kg \cdot kg^{-1}]$	$X_U = 0,6 [kg \cdot kg^{-1}]$

Tabulka 6.3: Poměr popelové bilance a hmotnostní podíl uhlíku v tuhých zbytcích

$$b = \frac{A^r}{C^r} \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (6.26)$$

$$b = \frac{0,21}{0,56} \cdot \left(\frac{0,0006 \cdot 0,4}{1 - 0,0006} + \frac{0,0779 \cdot 0,6}{1 - 0,0779} \right) = \underline{0,019} \quad [kg \cdot kg^{-1}]$$

Hodnoty C_i a X_i vyjadřují hmotnostní podíl uhlíku, neboli nedopal v tuhých zbytcích.

Část uhlíku, která shoří dokonale na plynnou složku CO vyjádříme jako podíl **b** dle vztahu (6.27).

$$a_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.27)$$

$$a_1 = \frac{6,696 \cdot 6,729 \cdot 10^{-5}}{-6,043 \cdot 0,0567 + 2,378 \cdot 6,729 \cdot 10^{-5} + 1,266} = \underline{4,88 \cdot 10^{-4}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočet součinitele přebytku vzduchu dle vztahu (6.28).

$$\alpha = \frac{R4 \cdot \omega_{O_2} + R5 \cdot \omega_{CO} + R6}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad [1] \quad (6.28)$$

$$\alpha = \frac{-0,169 \cdot 0,0567 - 0,546 \cdot 6,729 \cdot 10^{-5} + 1,245}{-6,043 \cdot 0,0567 + 2,378 \cdot 6,729 \cdot 10^{-5} + 1,266} = \underline{1,338} \quad [1]$$

- *Určení objemového podílu oxidu uhelnatého ve směsi plynů v suchých spalínách*

Přepočet korigovaného množství CO při referenčním kyslíku $O_2 = 6 \%$ na skutečný stav dle vztahu (6.29).

$$c_{CO} = c_{COref} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.29)$$

$$c_{CO} = 93,88 \cdot \frac{21 - 7,56}{21 - 6} = \underline{84,116} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Určení hustoty oxidu uhelnatého dle vztahu (6.30).

$$\rho_{CO} = \frac{M_{mol}}{V_{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.30)$$

$$\rho_{CO} = \frac{28,01}{22,4} = \underline{1,25} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde: M_{mol} ... molární hmotnost $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

V_{mol} ... molární objem $[\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Výpočet objemového podílu oxidu uhelnatého v plynných složkách u suchých spalín dle vztahu (6.31).

$$\omega_{CO} = c_{CO} \cdot \frac{1}{\rho_{CO} \cdot 10^6} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.31)$$

$$\omega_{CO} = 84,116 \cdot \frac{1}{1,25 \cdot 10^6} = \underline{6,729 \cdot 10^{-5}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$$

- *Výpočet objemu spalín*

Určení pomocných konstant R1 až R7 pro dané palivo:

$$\begin{aligned}
 R1 &= -V_{vs \min} \cdot V_{sCO} \\
 R1 &= -5,783 \cdot 1,045 = \underline{-6,043} \\
 R2 &= V_{vs \min} \cdot (0,5 \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_2) \\
 R2 &= 5,783 \cdot (0,5 \cdot 1,044 - 0,2095 \cdot 0,529) = \underline{2,378} \\
 R3 &= 0,2095 \cdot V_{vs \min} \cdot V_{sCO} \\
 R3 &= 0,2095 \cdot 5,783 \cdot 1,045 = \underline{1,266} \\
 R4 &= V_{sCO} \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \\
 R4 &= 1,045 \cdot (-0,162 + 0,019 \cdot 0,007) = \underline{-0,169} \\
 R5 &= V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{vs \min}) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \\
 R5 &= 0,529 \cdot (0,019 \cdot 1,044 - 0,2095 \cdot 5,783) - \\
 &\quad - 0,5 \cdot 1,044 \cdot (-0,162 + 0,019 \cdot 0,007) = \underline{-0,546} \\
 R6 &= V_{sCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{vs \min} - b \cdot V_{O_2}(C)) \\
 R6 &= 1,045 \cdot (0,2095 \cdot 5,783 - 0,019 \cdot 1,044) = \underline{1,245} \\
 R7 &= V_{vs \min} \cdot (0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 \cdot V_{vs \min} - b \cdot V_{O_2}(C)) \\
 R7 &= 5,783 \cdot (0,2095 \cdot (-0,162 + 0,019 \cdot 0,007) + \\
 &\quad + 0,2095 \cdot 5,783 - 0,019 \cdot 1,044) = \underline{6,696}
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} [1] \quad (6.32)$$

Přitom musí platit:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_{ss \min} - V_{vs \min} \\
 V_1 &= 5,621 - 5,783 = \underline{-0,162} \\
 V_2 &= V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \\
 V_2 &= 1,045 + 0,5 \cdot 1,044 - 1,038 = \underline{0,529} \\
 V_3 &= V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \\
 V_3 &= 1,044 - 1,038 = \underline{0,007}
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} [1] \quad (6.33)$$

Výpočet součinitele přebytku vzduchu za kotlem dle vztahu (6.34).

$$\alpha_k = \frac{(R_7 - a_1 \cdot R_2) \cdot (R_4 \cdot (\omega_{O_2})_k + R_6) + a_1 \cdot R_5 \cdot (R_1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R_3)}{(R_7 - a_1 \cdot R_2) \cdot (R_1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R_3) + a_1 \cdot R_2 \cdot (R_1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R_3)} \quad [1] \quad (6.34)$$

$$\alpha_k = \frac{(6,696 - 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,378) \cdot (-0,169 \cdot 0,0756 + 1,245) + (6,696 - 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,378) \cdot (-6,043 \cdot 0,0756 + 1,266) + 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot (-0,546) \cdot (-6,043 \cdot 0,0756 + 1,266)}{+ 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,378 \cdot (-6,043 \cdot 0,0756 + 1,266)} = \underline{1,523} \quad [1]$$

Určení objemu suchých spalin vzniklých spálením 1kg paliva dle vztahu (6.35).

$$V_{ss} = V_{ss \min} + a_1 \cdot (V_{s_{CO}} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{s_{CO_2}}) + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{s_{CO_2}}) + (\alpha_k - 1) \cdot V_{vs \min} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.35)$$

$$V_{ss} = 5,621 + 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot (1,045 + 0,5 \cdot 1,044 - 1,038) + 0,019 \cdot (1,044 - 1,038) + (1,523 - 1) \cdot 5,783 = \underline{8,646} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

Určení objemu vodních par ve spalinách dle vztahu (6.36).

$$V_{s_{H_2O}} = V_{s_{H_2O \min}} + (\alpha_k - 1) \cdot (v - 1) \cdot V_{vs \min} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.36)$$

$$V_{s_{H_2O}} = 0,613 + (1,523 - 1) \cdot (1,01 - 1) \cdot 5,783 = \underline{0,643} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

Určení objemu vlhkých spalin dle vztahu (6.37).

$$V_s = V_{ss} + V_{s_{H_2O}} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.37)$$

$$V_s = 8,646 + 0,643 = \underline{9,289} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet poměrného obsahu vodní páry dle vztahu (6.38).

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{s_{H_2O}}}{V_s} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (6.38)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,643}{9,289} = \underline{0,069} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}]$$

6.5 Určení střední měrné tepelné kapacity spalin

Při provozu parních kotlů je komínová ztráta největší. Výpočet střední měrné tepelné kapacity spalin je významnou částí k přesnému určení účinnosti kotle.

Určení konstant A, B, C dle vztahu (6.39) vyjádřených ve vazbě na součinitele přebytku vzduchu α .

$$\left. \begin{aligned} A &= A_0 + \alpha \cdot A_\alpha \\ A &= 0,0003 + 1,338 \cdot 0,0009 = \underline{0,0015} \\ B &= B_0 + \alpha \cdot B_\alpha \\ B &= 1,2446 + 1,338 \cdot 7,067 = \underline{10,7} \\ C &= C_0 + \alpha \cdot C_\alpha \\ C &= -85,417 + 1,338 \cdot 75,862 = \underline{16,086} \end{aligned} \right\} [1] \quad (6.39)$$

Určení konstant A_0 , B_0 , C_0 pro známé složení spalin dle vztahu (6.40) Hodnoty koeficientů jsou uvedeny v tabulce (6.4).

I	složka	A (I)	B (I)	C (I)
1	CO ₂	4,164 716·10 ⁻⁴	1,789 756	-77,301 592
2	SO ₂	2,578 208·10 ⁻⁴	2,028 744	-87,341 506
3	N ₂	1,324 242·10 ⁻⁴	1,219 579	12,392 970
4	Ar	-0,001 547·10 ⁻⁴	0,927 920	0,940 106
5	H ₂ O	2,939 415·10 ⁻⁴	1,325 136	23,236 609
6	Vzduch suchý	1,538 565·10 ⁻⁴	1,208 695	12,885 736
8	O ₂	1,745 297·10 ⁻⁴	1,267 865	-2,515 435
9	CO	1,707 545·10 ⁻⁴	1,190 457	17,506 083

Tabulka 6.4: Koeficienty A (I), B (I), C (I) složek spalin a vzduchu

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot A_1 + V_{sSO_2} \cdot A_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A_3 + \\
 &\quad + V_{vAr} \cdot A_4 + V_{sH_2O} \cdot A_5 - V_{vsmin} \cdot [A_6 + (\nu - 1) \cdot A_5] + \\
 &\quad + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A_8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot A_9 \\
 A_0 &= \left[(1 - 4,88 \cdot 10^{-4} - 0,019) \cdot 1,038 + 0,02 \right] \cdot 4,164716 \cdot 10^{-4} + \\
 &\quad + 0,004 \cdot 2,578208 \cdot 10^{-4} + (0,008 + 4,516) \cdot 1,324242 \cdot 10^{-4} + \\
 &\quad + 0,054 \cdot (-1,547 \cdot 10^{-4}) + 0,643 \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4} - \\
 &\quad - 5,783 \cdot [1,538565 \cdot 10^{-4} + (1,01 - 1) \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4}] + \\
 &\quad + (0,5 \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} + 0,019) \cdot 1,044 \cdot 1,745297 \cdot 10^{-4} + \\
 &\quad + 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 1,045 \cdot 1,707545 \cdot 10^{-4} = \underline{0,003} \\
 B_0 &= \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot B_1 + V_{sSO_2} \cdot B_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B_3 + \\
 &\quad + V_{vAr} \cdot B_4 + V_{sH_2O} \cdot B_5 - V_{vsmin} \cdot [B_6 + (\nu - 1) \cdot B_5] + \\
 &\quad + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B_8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot B_9 \\
 B_0 &= \left[(1 - 4,88 \cdot 10^{-4} - 0,019) \cdot 1,038 + 0,02 \right] \cdot 1,789756 + \\
 &\quad + 0,004 \cdot 2,028744 + (0,008 + 4,516) \cdot 1,219579 + \\
 &\quad + 0,054 \cdot 0,92792 + 0,643 \cdot 1,325136 - \\
 &\quad - 5,783 \cdot [1,208695 + (1,01 - 1) \cdot 1,325136] + \\
 &\quad + (0,5 \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} + 0,019) \cdot 1,044 \cdot 1,267865 + \\
 &\quad + 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 1,045 \cdot 1,190457 = \underline{1,245} \\
 C_0 &= \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot C_1 + V_{sSO_2} \cdot C_2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C_3 + \\
 &\quad + V_{vAr} \cdot C_4 + V_{sH_2O} \cdot C_5 - V_{vsmin} \cdot [C_6 + (\nu - 1) \cdot C_5] + \\
 &\quad + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C_8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot C_9
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} [1] \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned}
C_0 = & [(1 - 4,88 \cdot 10^{-4} - 0,019) \cdot 1,038 + 0,02] \cdot (-77,301592) + \\
& + 0,004 \cdot (-87,341506) + (0,008 + 4,516) \cdot 12,39297 + \\
& + 0,054 \cdot 0,940106 + 0,643 \cdot 23,236609 - \\
& - 5,783 \cdot [12,885736 + (1,01 - 1) \cdot 23,236609] + \\
& + (0,5 \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} + 0,019) \cdot 1,044 \cdot (-2,515435) + \\
& + 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 1,045 \cdot 17,506083 = \underline{-85,417}
\end{aligned} \quad [1]$$

Určení konstant A_α , B_α , C_α pro známé složení spalín dle vztahu (6.41).

$$\begin{aligned}
A_\alpha &= V_{vs \min} \cdot [A_6 + (\nu - 1) \cdot A_5] \\
A_\alpha &= 5,783 \cdot (1,538565 \cdot 10^{-4} + (1,01 - 1) \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4}) = \underline{0,0009} \\
B_\alpha &= V_{vs \min} \cdot [B_6 + (\nu - 1) \cdot B_5] \\
B_\alpha &= 5,783 \cdot (1,208695 + (1,01 - 1) \cdot 1,325136) = \underline{7,067} \\
C_\alpha &= V_{vs \min} \cdot [C_6 + (\nu - 1) \cdot C_5] \\
C_\alpha &= 5,783 \cdot (12,885736 + (1,01 - 1) \cdot 23,236609) = \underline{75,862}
\end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} [1] \quad (6.41)$$

Určení střední měrné tepelné kapacity spalín při vztažené teplotě ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) dle vztahu (6.42).

$$\begin{aligned}
\overline{c}_{s(t_0)} &= \frac{A \cdot (t_0 + 273) + B + \frac{C}{t_0 + 273}}{V_s} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.42) \\
\overline{c}_{s(t_0)} &= \frac{0,0015 \cdot (20 + 273) + 10,7 + \frac{16,086}{20 + 273}}{9,289} = \underline{1,205} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]
\end{aligned}$$

Určení střední měrné tepelné kapacity při teplotě (t_k) za kotlem dle vztahu (6.43).

$$\begin{aligned}
\overline{c}_s(t_k) &= \frac{A \cdot (t_k + 273) + B + \frac{C}{t_k + 273}}{V_s} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.43) \\
\overline{c}_s(t_k) &= \frac{0,0015 \cdot (134,6 + 273) + 10,7 + \frac{16,086}{134,6 + 273}}{9,289} = \underline{1,222} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]
\end{aligned}$$

Střední integrální hodnota v intervalu ($t_k - t_0$) je dána dle vztahu (6.44).

$$\begin{aligned}
\overline{c}_s &= \frac{\overline{c}_s(t_k) \cdot t_k - \overline{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.44) \\
\overline{c}_s &= \frac{1,222 \cdot 134,6 - 1,205 \cdot 20}{134,6 - 20} = \underline{1,225} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]
\end{aligned}$$

6.6 Určení poměrných tepelných ztrát

Výpočet ztráty hořlavinou ve spalínách dle vztahu (6.45).

$$\zeta_{CO} = \frac{12640 \cdot a_1 \cdot V_{sCO}}{Q_1} \quad [1] \quad (6.45)$$

$$\zeta_{CO} = \frac{12640 \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot 1,045}{21830} = \underline{0,0003} \quad [1]$$

Výpočet ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích dle vztahu (6.46).

$$\zeta_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32600}{Q_1} \quad [1] \quad (6.46)$$

$$\zeta_C = \frac{0,019 \cdot 0,56 \cdot 32600}{21830} = \underline{0,0159} \quad [1]$$

Výpočet ztráty fyzickým teplem spalín dle vztahu (6.47).

$$\zeta_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s (t_k - t_0)}{Q_1} \quad [1] \quad (6.47)$$

$$\zeta_k = \frac{9,289 \cdot 1,225 \cdot (134,6 - 20)}{21830} = \underline{0,0597} \quad [1]$$

Výpočet ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků při 20 °C vztažené teploty dle vztahu (6.48). Pro tento výpočet musíme znát střední tepelnou kapacitu ložového popele vztah (6.49) a úletového popele vztah (6.50).

$$\zeta_f = \frac{A^r \cdot \sum \frac{X_i \cdot \bar{c}_{si} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i}}{Q_1} \quad [1] \quad (6.48)$$

$$\zeta_f = \frac{0,21 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 0,7479 \cdot (71,6 - 20)}{1 - 0,0006} + \frac{0,6 \cdot 0,7796 \cdot (134,6 - 20)}{1 - 0,0779} \right)}{21830}$$

$$\zeta_f = \underline{0,0007} \quad [1]$$

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{i_1} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (6.49)$$

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 71,6 = \underline{0,7479} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{i_2} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}] \quad (6.50)$$

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 134,6 = \underline{0,7796} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

• Tepelný výkon

Výpočet tepelného výkonu parního kotle dle vztahu (6.51).

$$\dot{Q}_{\gamma r} = \dot{m}_{pp} \cdot h_{pp} + \dot{m}_{odluh} \cdot h_{odluh} + \dot{m}_{chl.pop} \cdot h_{chl.pop} - \dot{m}_{nv} \cdot h_{nv} \quad [MW] \quad (6.51)$$

$$\dot{Q}_{vyr} = \frac{127,32 \cdot 3441,8 + 1,68 \cdot 1424,3 + 46,68 \cdot 108,43 - (127,32 + 1,68) \cdot 658,37}{3600}$$

$$\dot{Q}_{vyr} = \underline{100,204} \quad [\text{MW}]$$

- *Ztráta sdílením tepla do okolí*

Výpočet ztráty sdílením tepla do okolí v souvislosti s výkonem kotle dle vztahu (6.52). Výpočet dle normy ČSN 070302 není přesný, jelikož nezohledňuje ztrátu sdílením tepla do okolí při spalování v parních kotlích s atmosférickou fluidní vrstvou, kde jsou aplikovány rozměrné nechlazené cyklónové odlučovače, a tudíž bude v následujících výpočtech pro danou ztrátu použita norma ČSN EN 12952-15.

$$\zeta_{sv} = \zeta_{svj} \cdot \frac{\dot{Q}_{vyrj}}{\dot{Q}_{vyr}} \quad [1] \quad (6.52)$$

$$\zeta_{svj} = k_l \cdot \dot{Q}_{vyrj}^{-0,35} \cdot 10^{-2} \quad [1] \quad (6.53)$$

$$\zeta_{svj} = 3 \cdot 126,8^{-0,35} \cdot 10^{-2} = \underline{0,0055} \quad [1]$$

$$\text{kde: } k_l \dots \text{konstanta paliva} \quad [1]$$

Konstantu k_l určíme 3. Norma ČSN 070302 pro palivo, která uvádí konstantu: hnědé uhlí 2,5, černé uhlí 3,5.

Určení tepelné ztráty sáláním a konvekcí v MW dle normy ČSN EN 12952-15 viz vztah (6.54).

$$\dot{Q}_{RC} = C \cdot \dot{Q}_N^{0,7} \quad [\text{MW}] \quad (6.54)$$

$$\dot{Q}_{RC} = 0,0315 \cdot 126,8^{0,7} = \underline{0,9343} \quad [\text{MW}]$$

$$\text{kde: } C \dots \text{je } 0,0315 \text{ u fluidních kotlů spalujících hnědé uhlí} \quad [-]$$

$$\dot{Q}_N \dots \text{je maximálně využitelný tepelný výkon} \quad [\text{MW}]$$

Výpočet tepelné ztráty sáláním a konvekcí dle vztahu (6.55).

$$\zeta_{sv} = \frac{\dot{Q}_{RC}}{\dot{Q}_{vyr}} \quad [1] \quad (6.55)$$

$$\zeta_{sv} = \frac{0,9343}{100,204} = \underline{0,0093} \quad [1]$$

6.7 Výpočet nepřímé účinnosti

$$\eta = 1 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_f - \zeta_{sv} \quad [1] \quad (6.56)$$

$$\eta = 1 - 0,0003 - 0,0159 - 0,0597 - 0,0007 - 0,0093 = \underline{0,9141} \quad [1]$$

U kotle K11 jsem pomocí nepřímé účinnosti (bez odsíření) vypočetl účinnost 91,41 %. Přestože po dobu topné zkoušky bylo dávkování aditiva velmi nízké, bude v této práci

proveden výpočet účinnosti rovněž při odsiřování. Toto nízké množství aditiva má souvislost se spalováním nízkosírnatého paliva.

6.8 Tepelná a hmotnostní bilance spalování při odsiřování spalin

Odsiření spalin v dnešní energetice je velmi častou metodou snížení sirných emisí. U parních kotlů spalujících uhlí se nejčastěji jedná o oxidy síry. Tyto metody fungují na chemických nebo chemicko – fyzikálních principech. Základní dělení máme na metody regenerativní a neregenerativní.

- *Regenerativní metoda:* aktivní látka cirkuluje mezi absorbcí a regenerací.
- *Neregenerativní metoda:* aktivní látka po regeneraci s oxidem siřičitým opouští proces jako produkt odsiřování.

Další dělení na metody odsiřování mokré nebo suché.

- *Mokrý metoda:* u spalin dochází ke kontaktu s vodním roztokem nebo suspenzí a látkou
- *Suchá metoda:* teplota spalin nesmí klesnout pod rosný bod vody. Patří sem také metody katalytické

Suchá aditivní metoda je úspěšně používána na K11. Spočívá na metodě dávkování jemně mletého vápence do spalovací komory. Při tomto procesu dochází k vázání oxidu síry na vápenný iont. Tento produkt odchází společně se spalinami do elektroodlučovačů, kde dojde k odloučení a společně s popílkem se deponuje.

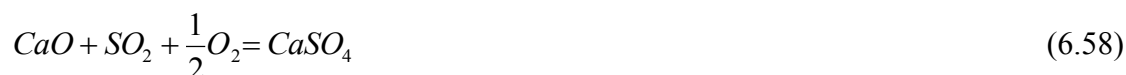
Přesnost výpočtu hmotové a energetické bilance závisí na množství vzduchu a spalin (i na jiných veličinách) a také na respektování příslušných chemických reakcí.

6.9 Odsiřování spalin

Přidávání vápence (uhličitanu vápenatého) do ohniště probíhá zpočátku dle reakce rovnice (6.57).



U přímého odsiřování spalin dochází k reakci CaO se složkami spalin podle rovnice (6.58).



Přepočít korigované hodnoty oxidu siřičitého na skutečný stav dle vztahu (6.59).

$$c_{\text{SO}_2} = c_{\text{SO}_{2r}} \cdot \frac{21 - \text{O}_2}{21 - \text{O}_{2r}} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.59)$$

kde: O_{2r} ... referenční obsah kyslíku [%]

$$c_{\text{SO}_2} = 236,62 \cdot \frac{21 - 7,56}{21 - 6} = \underline{212,012} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Určení hustoty oxidu siřičitého dle vztahu (6.60).

$$\rho_{SO_2} = \frac{M_{mol}}{V_{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.60)$$

$$\rho_{SO_2} = \frac{64,06}{21,8} = \underline{2,94} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde: M_{mol} ... molární hmotnost $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

V_{mol} ... molární objem $[\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Stupeň odsíření n_s dle vztahu (6.61) vyjadřuje zmenšení u reakce (6.58), kde se obsah SO_2 ve spalínách zmenší o vázanou část z SO_2 na CaSO_4 .

$$n_s = 1 - \frac{V_{ss} \cdot \omega_{SO_2}}{0,68265 \cdot S_{spal}} \quad [1] \quad (6.61)$$

$$n_s = 1 - \frac{8,646 \cdot 7,2113 \cdot 10^{-5}}{0,68265 \cdot 0,006} = \underline{0,8478} \quad [1]$$

Výpočet objemového podílu oxidu siřičitého ve směsi plynů suchých spalín dle vztahu (6.62).

$$\omega_{SO_2} = c_{SO_2} \cdot \frac{1}{\rho_{SO_2} \cdot 10^6} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.62)$$

$$\omega_{SO_2} = 212,012 \cdot \frac{1}{2,94 \cdot 10^6} = \underline{7,2113 \cdot 10^{-5}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$$

Určení stechiometrického poměru vápníku dle vztahu (6.63), tento poměr nám vyjadřuje přebytek vápníku pro zabezpečení pokud možno absolutního odsíření spalín.

Přepočet množství aditiva:

$$\dot{m}_{ad} = \frac{0,01 \cdot 1000}{3600} = \underline{0,003} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$n_{Ca} = \frac{\dot{m}_{ad}}{S^r \cdot k_s \cdot \dot{m}_{pal}} \quad [1] \quad (6.63)$$

$$n_{Ca} = \frac{0,003}{0,006 \cdot 3,1219 \cdot 5,022} = \underline{0,0295} \quad [1]$$

kde: n_{ca} ... stechiometrický poměr vápníku $[1]$

k_s ... hodnota součinitele při odsířování pomocí CaCO_3 je 3,1219 $[1]$

Výpočet hmotnostního průtoku paliva do kotle dle vztahu (6.64).

$$\dot{m}_{pal} = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{Q_i^r \cdot \eta} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.64)$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{100204}{21830 \cdot 0,9141} = \underline{5,022} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- *Určení objemu vzduchu a spalin*

Při přímém odsíření spalin, dochází ke změně objemu spalovacího vzduchu i složení a objemu spalin. Hodnoty těchto veličin, vypočítané pomocí rovnic z předešlých kapitol, budou opraveny dle dalších rovnic (značky s indexem K).

Výpočet objemu spalovacího vzduchu dle vztahu (6.65).

$$V_{vsK} = V_{vs \min} \cdot \alpha + 1,66779 \cdot S \cdot n_s \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.65)$$

$$V_{vsK} = 5,621 \cdot 1,338 + 1,66779 \cdot 0,006 \cdot 0,8478 = \underline{7,746} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočet objemu suchých spalin dle vztahu (6.66).

$$V_{ssK} = V_{ss} + S \cdot (0,63694 \cdot n_s + 0,69435 \cdot n_{Ca}) \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.66)$$

$$V_{ssK} = 8,646 + 0,006 \cdot (0,63694 \cdot 0,8478 + 0,69435 \cdot 0,0295)$$

$$V_{ssK} = \underline{8,649} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Výpočet objemu CO₂ ve spalinách dle vztahu (6.67).

$$V_{CO_2K} = V_{sCO_2} + S \cdot (0,00055 \cdot n_s + 0,69435 \cdot n_{Ca}) \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.67)$$

$$V_{CO_2K} = 1,038 + 0,006 \cdot (0,00055 \cdot 0,8478 + 0,69435 \cdot 0,0295)$$

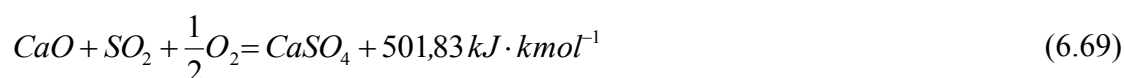
$$V_{CO_2K} = \underline{1,038} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- *Energetická bilance*

Reakce dle vztahu (6.68) je endotermní.



Reakce dle vztahu (6.69) je exotermní.



Reakce dle vztahu (6.70), v níž se změní (zdánlivě) výhřevnost paliva.

$$Q_{iK}^r = Q_i^r + \Delta Q_i^r \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.70)$$

$$Q_{iK}^r = 21830 - 78,63 = \underline{21751} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

kde:

$$\Delta Q_i^r = S \cdot (15652 \cdot n_s - Q_{Ca} \cdot n_{Ca}) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.71)$$

$$\Delta Q_i^r = 0,006 \cdot (15652 \cdot 0,8478 - 5583 \cdot 0,0295) = \underline{78,63} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{kde: } Q_{Ca} \dots \text{ odsíření pomocí CaCO}_3 \text{ je } 5583 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- *Hmotnostní bilance kotle*

Množství vzniklých tuhých zbytků po spalování, které se zvětší o reakcí vzniklý CaSO_4 a nezreagovaný přebytek oxidu vápenatého. V popelové bilanci je nutné počítat nejen s původní minerální složkou A^r , ale také dalšími složkami:

$$A_{\text{CaO}} = 1,7492 \cdot S \cdot (n_{\text{Ca}} - n_s) \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.72)$$

$$A_{\text{CaO}} = 1,7492 \cdot 0,006 \cdot (0,0295 - 0,8478) = \underline{-0,0086} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$A_{\text{CaSO}_4} = 4,24632 \cdot S \cdot n_s \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.73)$$

$$A_{\text{CaSO}_4} = 4,24632 \cdot 0,006 \cdot 0,8478 = \underline{0,0216} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$A_K^r = A^r + A_{\text{CaO}} + A_{\text{CaSO}_4} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.74)$$

$$A_K^r = 0,21 - 0,0086 + 0,0216 = \underline{0,223} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Vypočítané zvětšení tuhých zbytků se musí dodržovat při výpočtu ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků a také u ztráty nedokonalým spálením uhlíku.

- *Určení účinnosti při odsiřování*

V následující tabulce (6.5) jsou uvedeny přepočtené hodnoty, nezbytné k úplnému a také přesnému sestavení energetické a hmotové bilance u přímého odsiřování.

značka	veličina	hodnota	jednotka
b	uhlík (nespálený)	0,02	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
a ₁	uhlík (nedokonale spálený)	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
α	přebytek vzduchu	1,337	1
V ₂	konstanta	0,529	1
V ₃	konstanta	0,006	1
R ₂	konstanta	2,378	1
R ₄	konstanta	-0,169	1
R ₅	konstanta	-0,545	1
R ₆	konstanta	1,244	1
R ₇	konstanta	6,69	1
V _s	vlhké spaliny	9,294	$\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\bar{c}_s(t_0)$	střední měrná tepelná kapacita spalin při teplotě t_0	1,201	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
$\bar{c}_s(t_k)$	střední měrná tepelná kapacita spalin při teplotě t_k	1,218	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
\bar{c}_s	střední integrální hodnota	1,221	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
A	konstanta	0,0015	1
B	konstanta	10,658	1

C	konstanta	17,52	1
A ₀	konstanta	0,0003	1
B ₀	konstanta	1,213	1
C ₀	konstanta	-83,875	1

Tabulka 6.5: Přepočtené hodnoty u odsiřování

Určení ztrát a výpočet účinnosti parního kotle K11 včetně přepočtu na odsiřování viz tabulka (6.6).

značka	Tepelné ztráty	poměr	jednotka
ζ_{CO}	ztráta hořlavinou - spaliny	0,03	%
ζ_C	ztráta hořlavinou - tuhé zbytky	1,69	%
ζ_k	ztráta komínová - citelné teplo spalin	5,94	%
ζ_f	ztráta fyzickým teplem - tuhé zbytky	0,07	%
ζ_{sv}	ztráta sdílením tepla (do okolí)	0,93	%
$\Sigma\zeta$	Celková ztráta	8,66	%
η	ÚČINNOST	91,34	%

Tabulka 6.6: Hodnoty ztrát a účinnosti

Z výsledku vyplývá, že účinnost parního kotle ovlivňuje zejména komínová ztráta neboli citelné teplo spalin. Spaliny mají za poslední teplosměnnou plochou vyšší teplotu. Tato vyšší teplota musí být dodržena z důvodu rosného bodu.

Dále ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanickým nedopalem). Tento nedopal vzniká nevyužitím hořlavých složek ve spalinách.

7. NÁVRH ÚPRAVY DOPRAVNÍ TRASY PALIVA DO KOTLE

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [19]

Cílem návrhu je náhrada současné pneumatické dopravy drceného uhlí do spalovací komory za mechanickou dopravu, což umožní snížit přebytek spalovacího vzduchu. Jedná se o přebytek vzduchu při provozu kotle na nižším výkonu (60 % jmenovitého výkonu a nižším). Tento přebytek má vliv na množství emisí NO_x ve spalinách a přebytek O_2 , jenž má vliv na komínovou ztrátu kotle.

Na kotli K11 je řešena příprava paliva dvěma větvemi, každá větev je dimenzovaná na dosažení 60% výkonu kotle. Spotřeba paliva při jmenovitém výkonu bývá 34 t/hod.

Palivo je vypouštěné z vagonu do hlubinných zásobníků, dále je pomocí vyhrnovacího zařízení dopravováno na vodorovný dopravní pás. Potom se palivo dopraví pomocí dalších pásových dopravníků korýtkového profilu do dvourotorového drtiče. Na prvním pásovém dopravníku je umístěný separátor kovů. Rozdrcené palivo o zrnitosti max. 60 mm je dále dopravováno pásovými dopravníky a shrnováno do dvou vnitřních zásobníků paliva. Tyto zásobníky paliva mají nainstalováno odsávací zařízení DALAMATIC, CONCEPT D90 s integrovaným ventilátorem CSR18. Toto zařízení při plnění a vyprazdňování zásobníků zabraňuje úniku prachu do okolí. Zároveň instalované odsávací zařízení zajišťuje odsávání vzniklé nebezpečné výbušné atmosféry z vnitřních prostor vlastních zásobníků surového paliva, neboli snižuje koncentraci prachových částic pod dolní mez výbušnosti.

Ve vnitřních zásobnících paliva je tvořena zásoba uhlí pro šesti hodinový provoz při plném výkonu.

7.1 Popis současného stavu dopravy paliva

Z vnitřních zásobníků paliva je palivo dopravováno řetězovým dopravníkem přes rotační podávač až do drtiče. Řetězové dopravníky tahají uhlí dozadu z bunkru vrchní větví, dále spodem v protisměru vpřed, kde sypké palivo padá do šachty k rotačnímu podávači. Rotační komorový podávač uhlí palivo kontinuálně dávkuje do drtiče uhlí. Použité rotační podavače jsou od firmy KÖLLEMANN – typ AJK ZZSS WN. Drtič je konstrukčně řešen jako nárazový kladívkový od firmy Aulmann&Beckschulte, resp. AUBEMA. V drtiči je palivo upravováno na požadovanou zrnitost 0 - 6 mm. Jemnost mletí se nastavuje pomocí mlecích stěn. Do drtičů je přiváděný sekundární vzduch o teplotě cca 135 °C, který rozdrcené a částečně vysušené uhlí dopravuje pneumaticky do spalovací komory. Vzduch proudí přes drtič, přitom suší palivo na zbytkovou vlhkost cca 2%. Práškové potrubí je pro zvýšenou odolnost proti otěru vyložené speciálním otěruvzdorným čedičem a je v něm umístěný deskový uzávěr a uhelná klapka. Bezpečnostní uzavírací klapka je umístěna v práškovodě, jež zabraňuje zpětnému proudění popela ze spalovací komory do práškovodu. Deskový uzávěr je ovládán elektropohonem a uhelná klapka

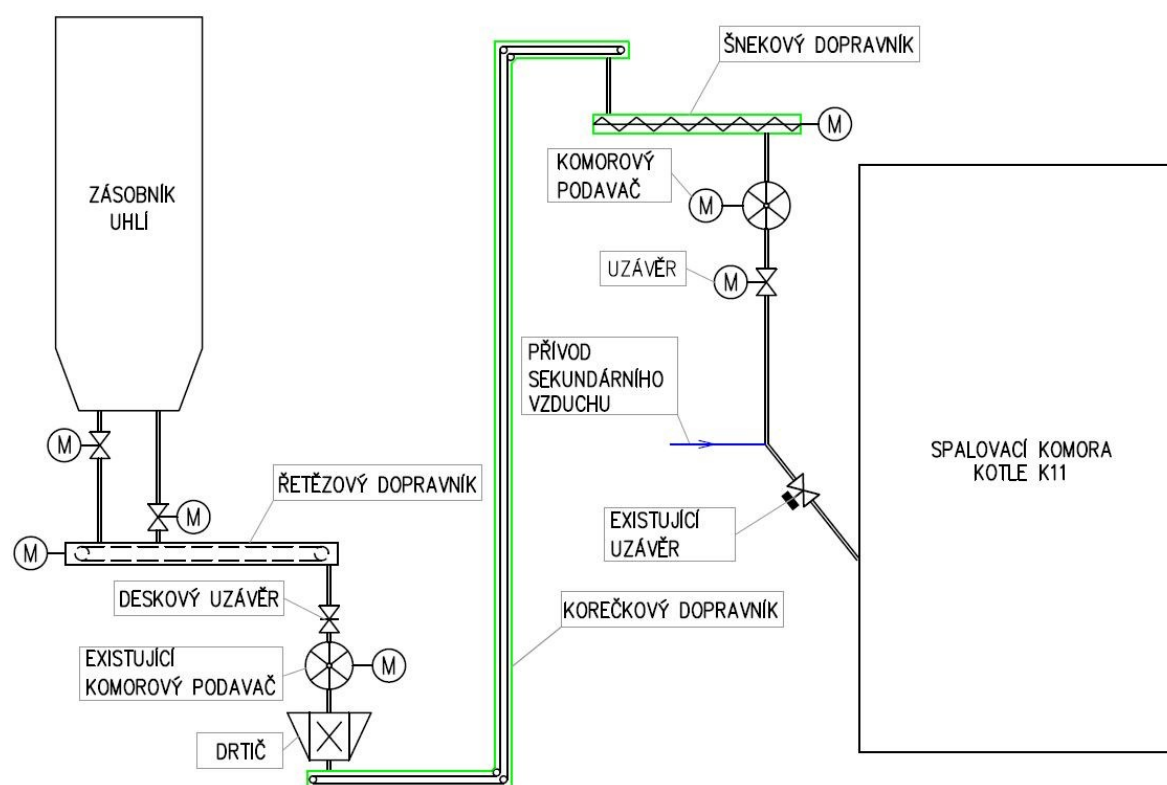
pneumaticky. Deskový uzávěr slouží k oddělení spalovací komory od části přípravy paliva pro případ údržby nebo opravy. Rotační uzávěr slouží jako tlakový uzávěr mezi spalovací komorou a zásobníkem v době provozu. Regulace množství paliva je řešena změnou otáček řetězového dopravníku pomocí frekvenčního měniče.

Pro případnou inertizaci je přiveden dusík jak do spodní části zásobníku surového uhlí, tak i do obou řetězových dopravníků a obou rotačních podávačů. Kotel je vybaven monitorovacím systémem O_2 a CO popsáným v kapitole (3.5).

Systém práškovodu a drtičů je vybaven plně automatickým protivybušným systémem HRD. Jedná se o hasící techniku, která se vyznačuje extrémně rychlou detekcí s následnou okamžitou reakcí spočívající v rychlém vnesení hasícího prostředku do chráněného zařízení.

7.2 Popis navržené úpravy dopravy paliva

Navrhují, změnu pneumatické dopravy na mechanickou viz obrázek (7.1) při zachování původních zásobníků surového paliva, svodky do rotačního podavače a drtiče uhlí.



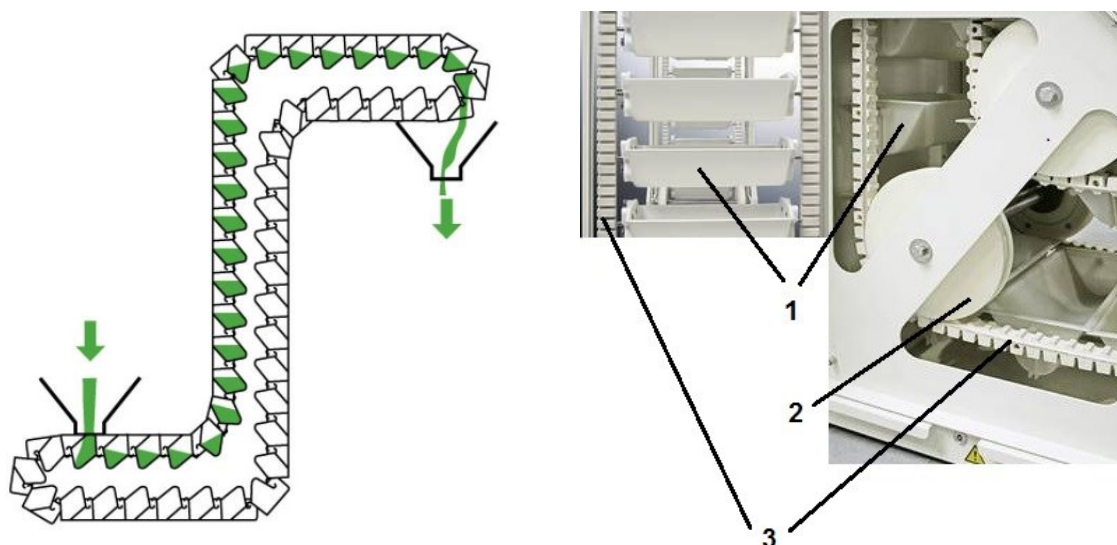
Obr. 7.1: Schéma navržené mechanické dopravy paliva do kotle K11

Svodka pod drtičem bude upravena pro připojení nově navrženého vertikálního dopravníku pro mechanickou dopravu uhlí. Za svodkou bude umístěn korečkový vertikální dopravník, který bude dopravovat drcené palivo od úrovně +0,00 m do požadované výšky + 16,50 m. Dále bude palivo transportováno vodorovným bezosým šnekovým

dopravníkem, díky němuž se palivo dostane do svodky. Ve svodce bude umístěn komorový podavač, který zabraňuje proražení plamene ze spalovací komory do vnitřního zauhlovacího systému. Podavač bude vybaven vyprazdňovačem komor rotoru, jenž slouží k odstranění přichyceného uhlí z komor rotoru. Deskový uzávěr bude sloužit jako nouzový uzávěr pro případ údržby, oprav a revize na dopravní trase za provozu kotle. Stávající bezpečnostní uzávěr bude ponechán na původním místě.

7.2.1 Korečkový dopravník

Volím korečkový vertikální dopravník německého výrobce NERAK typ WB370. Tento dopravník má pevnou konstrukci, snadnou sestavu, nízkou hlučnost, kompaktnost a nenáročnou údržbu. Převážný výkon volím dle maximálního výkonu stávajících drtičů 26 t/h. Pohon dopravníku se skládá z motoru a šnekové převodovky, dle výrobce o výkonu 3 kW. Dále bude motor vybaven frekvenčním měničem pro zajištění plynulého rozjetí a zastavení dopravníku. Dopravník bude vybaven zařízením pro odstranění přebytečného materiálu, ve spodní části klouzajícími korečkami, brzdou zpětného chodu, mechanickým vyklepávačem pro podporu vyprázdnění korečků, snímačem otáček, kontrolou přetížení a kontrolou korečkového pásu pomocí dvou snímacích kladek s koncovým spínačem.



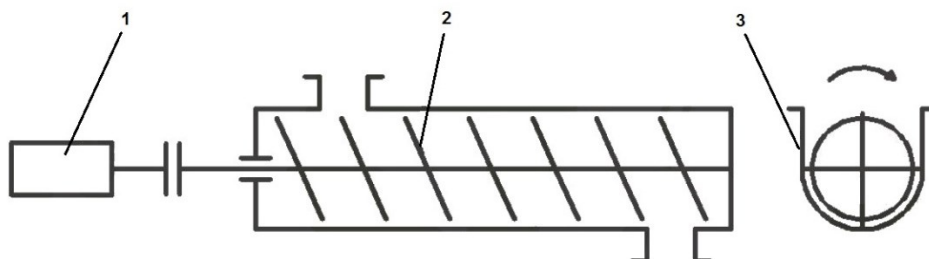
Obr. 7.2: Korečkový dopravník NERAK typ WB: 1 – korečky (polyamid se skelnými vlákny), 2 – kladky (litina), 3 – nosný pryžový řetěz s ocelovými lankami [23]

veličina	hodnota	jednotka
šířka korečků	370	mm
průměr nosné kladky	100	mm
otáčky pohonu	28	ot.min ⁻¹
převážný výkon	26	t.h ⁻¹
výkon motoru	3	kW

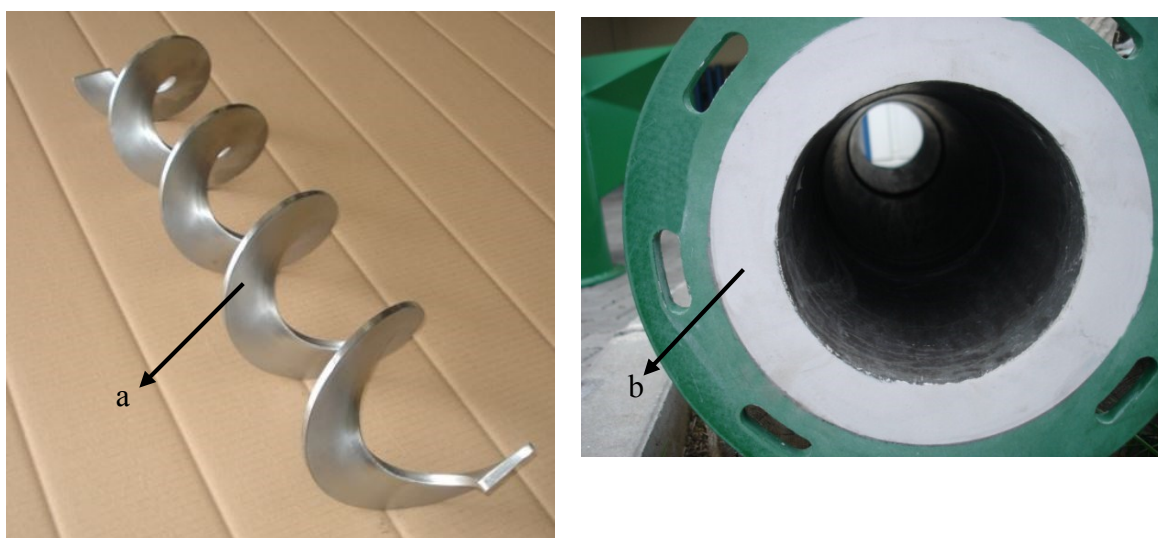
Tabulka 7.1: Technické parametry korečkový vertikální dopravník NERAK, WB370. [25]

7.2.2 Šnekový dopravník

Volím bezosý spirální dopravník RATAJ s čedičovou vložkou a nerezovou spirálou viz obrázek (7.3). Tento dopravník je vhodný pro náročnější použití, dále pro abrasivní, lepidlo a vlhké materiály. Dále má vysokou životnost a teplotní odolnost až do 400 °C.



Obr. 7.3: Schéma šnekového dopravníku: 1 – elektromotor, 2 – šnek, 3 – žlab [24]



Obr. 7.4: Šnekový dopravník: a) nerezová spirála, b) čedičová vložka [24]

- Objemový výpočet dopravního výkonu dle vztahu (7.1).

$$Q_v = \frac{Q}{\gamma} = \frac{23000}{800} = 28,75 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.1)$$

kde: γ ... sypná hmotnost uhlí, volím 800 [kg · m⁻³]

- Výpočet průměru šnekovnice dle vztahu (7.3).

Stoupání šnekovnice volím 0,8, pro výpočet průměru šnekovnice upravím vztah pro objemovou dopravní výšku (7.2).

$$Q_v = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot s \cdot \psi \cdot n \cdot c_H \quad [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.2)$$

kde: ψ ... součinitel plnění, volím 30 dle [19] [%]

n ... otáčky šneku, volím 1,2 dle [19] [s⁻¹]

c_H ... součinitel sklonu u vodorovných dopravníků 1 [-]

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_v}{3600 \cdot \pi \cdot \psi \cdot n \cdot c_H}} \quad [\text{m}] \quad (7.3)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 28,75}{3600 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 0,5}} = 0,41 \quad [\text{m}]$$

kde: c_H ... součinitel sklonu dopravníku pro 25° úhel stoupání,
volím 0,5 dle [19] [-]

Navrhuji průměr šnekovice $D = 0,45 \text{ m}$. Parametry šnekovice viz tabulka (7.2).

Vnější průměr D	Vnitřní průměr d	Stoupání s	Tloušťka čedičové vložky	Tloušťka šnekovice	Tloušťka vnější trubky
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
450	130	370	22	17	8

Tabulka 7.2: Parametry šnekovice [24]

- Výpočet příkonu dopravníku dle vztahu (7.4).

$$P = \frac{Q_v \cdot \gamma \cdot g}{3600} \cdot (l_v \cdot w \pm h) \quad [\text{W}] \quad (7.4)$$

kde: l_v ... vodorovná dopravní vzdálenost [m]

w ... celkový součinitel odporu, volím 4,0 dle [19] [-]

h ... dopravní výška [m]

$$P = \frac{28,75 \cdot 800 \cdot 9,81}{3600} \cdot (2,05 \cdot 4 + 0,95) = 573 \quad [\text{W}]$$

Po konzultaci s technikem RATAJ navrhuji pro pohon dopravníku 4 kW třífázový asynchronní elektromotor Nord.

7.3 Hrubý rozpočet mechanické dopravy

č. p.	Položka	Cena Kč bez DPH
1	Projektové práce + inženýring	1 200 000,00
2	2 x korečkový vertikální dopravník NERAK typ WB370	3 049 800,00
3	Doprava	95 000,00
4	2 x šnekový dopravník včetně převodovky a pohonu	780 00,00
5	2 x deskový uzávěr + elektro pohon	780 000,00
6	2 x přeložka vzduchového potrubí	478 000,00
7	2 x úprava výsypky	200 000,00
8	2 x úprava práškovodu	200 000,00
9	Stavební úprava	300 000,00
10	Materiál strojní	600 000,00
11	Dodávka elektro a MaR zařízení	900 000,00
12	Montážní práce strojní, elektro a MaR	3 000 000,00
13	Seřízení a uvedení do provozu	500 000,00
14	Dokumentace DSP	60 000,00
Celkem		12 141 200,00 (bez DPH)

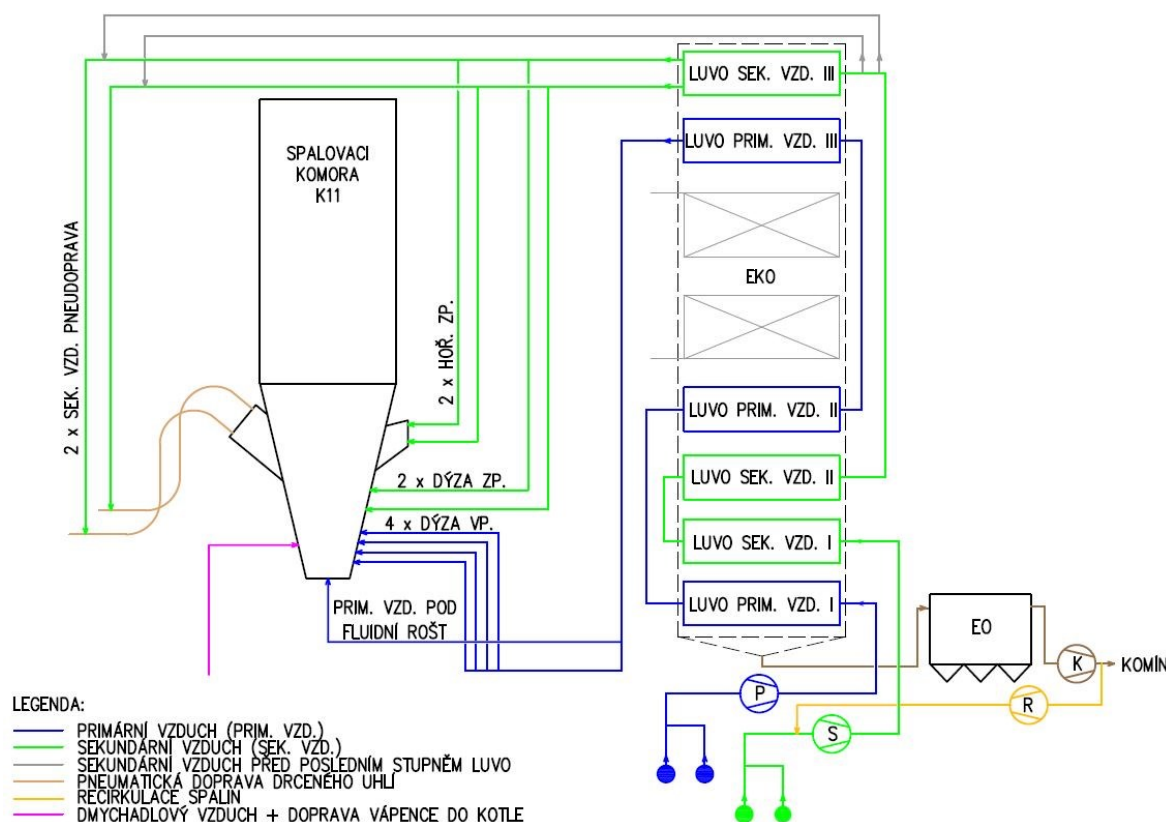
Tabulka 7.3: Rozpočet nákladu mechanické dopravy paliva

Investiční náklady pro realizaci navržené změny pneumatické dopravy paliva do kotle v provedení mechanické dopravy jsou dle tabulky (7.2) cca 12 000 000 Kč bez DPH. V ceně není počítáno s novým komorovým podavačem, jelikož doporučuji použít stávající.

8. NÁVRH RECIRKULACE SPALIN

Tato kapitola byla zpracována podle literatury [20], [21] a [22]

Cílem tohoto návrhu je přidat recirkulaci spalin. Toto primární opatření popsané v kapitole 4.2.1 snižuje obsah kyslíku a následkem ochlazení plamene bude omezena přeměna dusíku vázaného v palivu a také vytváření tepelných NO_x . Dle zkušenosti provedených realizací recirkulace spalin se předpokládá pokles emisí NO_x , tento pokles bývá 30 – 50 mg/m^3_{N} . Metoda recirkulace spočívá v odebrání části čistých spalin a jejich navrácení zpět do procesu spalování. Tyto spaliny budou odebrány za EO a spalinovým ventilátorem a dále nainstalovaným spalinovým ventilátorem vráceny zpět do spalovacího vzduchu viz obrázek (8.1). Dle dostupné literatury a již provedených instalací na jiných kotlích navrhuji 15 % recirkulaci spalin.



Obr. 8.1: Schéma vzduchu a navržené recirkulace spalin kotel K11:
P – primární ventilátor, S – sekundární ventilátor, K – kouřový ventilátor,
R – recirkulační ventilátor, EO – elektroodlučovač

8.1 Popis navrženého umístění recirkulace spalin

Recirkulační ventilátor o potřebném bude navržen dle výpočtu potřebného množství spalin do spalovacího vzduchu a také dle tlakových poměrů ve vzduchovém traktu v místě zaústění recirkulovaných spalin. Potrubí bude umístěno na ocelových konstrukcích ve výšce + 7,5 m. Potrubí sání recirkulačního ventilátoru bude zaústěno do výstupního potrubí

spalinového ventilátoru. Potrubí výtlačku bude vedené podél bočních stěn EO a kotelny a bude zaústěno do potrubí sání sekundárního ventilátoru. Navrhuji umístění recirkulačního ventilátoru v levém rohu místnosti EO +7,5 m. Pro umístění ventilátoru je nutné postavit betonovou základní desku včetně kotvících prvků. Dále bude na straně sání umístěna 100 % těsnící uzavírací armatura. Potřebné měření teploty, tlaku bude umístěno za ventilátorem.

8.1.1 Výpočet množství recirkulovaných spalin

Pro výpočet množství recirkulovaných spalin musím dopočítat hustotu spalin, určit rychlost a průměr dopravního potrubí. Určení hustoty jednotlivých složek spalin dle vztahu (8.1). Hustota ρ_{Ar} je určena dle literatury.

$$\rho_{xx} = \frac{M_{mol}}{V_{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (8.1)$$

kde: M_{mol} ... molární hmotnost [kg · kmol⁻¹]

V_{mol} ... molární objem [m³ · kmol⁻¹]

ρ_{xx} ... hustota jednotlivých složek [kg · m⁻³]

$$\rho_{CO_2} = \frac{44,01}{22,26} = \underline{1,98} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho_{O_2} = \frac{32}{22,39} = \underline{1,43} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{18,016}{22,4} = \underline{0,8} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho_{N_2} = \frac{28,013}{22,4} = \underline{1,25} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Stechiometrický objem hlavních složek ve spalinách byl vypočten v kapitole (6.3) a kapitoly (6.8). Obsah O₂ za EO je přepočten na procenta z průměrných naměřených hodnot při topné zkoušce. Složení vlhkých spalin je vypočítáno ze vztahu (8.2).

$$\left. \begin{aligned} \omega_{CO_2} &= \frac{V_{SCO_2}}{V_S} \cdot 100 = \frac{1,038}{9,294} \cdot 100 = \underline{11,17} \\ \omega_{H_2O} &= \frac{V_{SH_2O}}{V_S} \cdot 100 = \frac{0,645}{9,294} \cdot 100 = \underline{6,94} \\ \omega_{N_2} &= \frac{V_{SN_2} + (V_{Smin} \cdot \alpha_k \cdot 0,7809)}{V_S} \cdot 100 \\ \omega_{N_2} &= \frac{0,008 + (5,768 \cdot 1,523 \cdot 0,7809)}{9,294} \cdot 100 = \underline{73,75} \\ \omega_{Ar} &= \frac{V_{SAr}}{V_S} \cdot 100 = \frac{0,0538}{9,294} \cdot 100 = \underline{0,58} \end{aligned} \right\} [\%] \quad (8.2)$$

Výpočet hustoty spalín při normálních podmínkách dle vztahu (8.3).

$$\rho_{SV} = \frac{\omega_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + \omega_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + \omega_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + \omega_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + \omega_{Ar} \cdot \rho_{Ar}}{100} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (8.3)$$

$$\rho_{SV} = \frac{11,17 \cdot 1,98 + 7,56 \cdot 1,43 + 6,94 \cdot 0,8 + 73,75 \cdot 1,25 + 0,58 \cdot 1,78}{100}$$

$$\rho_{SV} = \underline{1,317} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Přepočet hustoty spalín na skutečné podmínky dle vztahu (8.4).

$$\rho_{SV_{SK}} = \rho_{SV} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_{sv})} \cdot \frac{p_{rec}}{101325} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (8.4)$$

kde: p_{rec} ... tlak spalín v místě připojení $[Pa]$

$$\rho_{SV_{SK}} = 1,317 \cdot \frac{273,15}{(273,15 + 134,6)} \cdot \frac{101361}{101325} = \underline{0,88} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

Výpočet hmotnostního průtoku paliva do kotle při jmenovitém výkonu dle vztahu (8.5).

$$\dot{m}_{pal} = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{Q_i^r \cdot \eta} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (8.5)$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{126800}{21830 \cdot 0,9134} = \underline{6,36} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

Výpočet množství spalín při jmenovitém výkonu dle vztahu (8.6).

$$V_{VS} = (V_S \cdot \dot{m}_{pal}) \cdot 3600 = 9,294 \cdot 6,36 \cdot 3600 = \underline{212795} \quad [m^3_N \cdot h^{-1}] \quad (8.6)$$

Výpočet množství recirkulovaných spalín při jmenovitém výkonu dle vztahu (8.7).

$$V_{rec} = V_{VS} \cdot 0,15 = 212795 \cdot 0,15 = \underline{31919} \quad [m^3_N \cdot h^{-1}] \quad (8.7)$$

Volím 35000 $[m^3_N \cdot h^{-1}]$.

8.1.2 Dimenze recirkulačního potrubí

Průměr spalínovodu pro recirkulaci výpočtu dle vztahu (8.8). Rychlost v potrubí volím 15 m/s.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \rho \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{35000}{3600}}{\pi \cdot 0,88 \cdot 15}} = \underline{0,968} \quad [m] \quad (8.8)$$

Volím průměr kruhového potrubí 1 m, tloušťky 3 mm, materiál S232JR.

8.1.3 Aerodynamický výpočet

Aerodynamický výpočet slouží k určení tlakových ztrát v potrubí při proudění spalin. Tento výpočet je nezbytný k navržení ventilátoru spalin.

Výpočet skutečné rychlosti pro zvolené potrubí dle vztahu (8.9).

$$w_{sk} = \frac{4 \cdot \frac{V_{rec}}{3600}}{\pi \cdot \rho \cdot d^2} = \frac{4 \cdot \frac{35000}{3600}}{\pi \cdot 0,88 \cdot 1^2} = \underline{12,38} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8.9)$$

Výpočet Reynoldsova čísla dle vztahu (8.10), kinematickou viskozitu určíme dle tabulek.

$$\text{Re} = \frac{w_{sk} \cdot D}{\nu} = \frac{12,38 \cdot 1}{25,5 \cdot 10^{-6}} = \underline{485490} \Rightarrow \text{turbulentní proudění} \quad [1] \quad (8.10)$$

Výpočet ztráty třením u neizotermického proudění dle vztahu (8.12), pro výpočet musíme určit součinitel tření dle Jakimova vztahu (8.11).

$$\lambda = 0,857 \cdot (\log \text{Re})^{-2} = 0,857 \cdot (\log 485490)^{-2} = \underline{0,0132} \quad [1] \quad (8.11)$$

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{w_{sk}^2}{2} \cdot \rho_{sk} \quad [\text{Pa}] \quad (8.12)$$

$$\Delta p_{1sání} = 0,0132 \cdot \frac{2,3}{1} \cdot \frac{12,38^2}{2} \cdot 0,88 = \underline{2} \quad [\text{Pa}]$$

$$\Delta p_{1výtlak} = 0,0132 \cdot \frac{57}{1} \cdot \frac{12,38^2}{2} \cdot 0,88 = \underline{51} \quad [\text{Pa}]$$

Výpočet tlakové ztráty místní dle vztahu (8.13).

$$\Delta p = \Delta \xi \cdot \frac{w_{sk}^2}{2} \cdot \rho_{sk} \quad [\text{Pa}] \quad (8.13)$$

kde: $\xi \dots$ součinitel místních ztrát [1]

Výpočet tlakové ztráty na straně sání ventilátoru:

- uzavírací armatura: $\xi = 0,15$
- dvě přírubové spoje: $\xi = 0,03$
- zúžení potrubí: $\xi = 0,03$
- vstup do potrubí recirkulace: $\frac{R}{D} = 0,42$; $\xi = 2$

$$\Delta p_{2sání} = 2,24 \cdot \frac{12,38^2}{2} \cdot 0,88 = \underline{151} \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta na straně sání byla vypočtena na 153 Pa.

Výpočet tlakové ztráty na straně výtlaku ventilátoru:

- tvarový přechod obdélník čtverec: $\zeta = 0,65$
- koleno 90° obdélníkové průřezu: $\zeta = 0,6$
- dvě kolena 90°: $\frac{R}{D} = 1$; $\zeta = 0,25$
- pět kolen 60°: $\frac{R}{D} = 1,5$; $\zeta = 0,16$
- osmnáct přírubových spojů: $\zeta = 0,03$
- vstup do potrubí sání sek. ventilátoru: $\frac{R}{D} = 0,77$; $\zeta = 0,3$

$$\Delta p_{\text{výtlak}} = 3,39 \cdot \frac{12,38^2}{2} \cdot 0,88 = \underline{229} \quad [\text{Pa}]$$

Celková tlaková ztráta na straně výtlaku byla vypočtena na 280 Pa.

Výpočet teplotní roztažnosti potrubí dle vztahu (8.14).

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad [\text{m}] \quad (8.14)$$

kde: α ... součinitel teplotní roztažnosti ocel = $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [K⁻¹]

$$\Delta l = 33 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot (135 - 20) \cdot 1000 = \underline{46} \quad [\text{mm}]$$

Výpočet byl proveden u nejdelšího přímého úseku potrubí. Pro zamezení přenosu osových sil a chvění v potrubí bude recirkulační ventilátor osazen na straně sání a výtlaku tkaninovým kompenzátozem. Dále bude umístěn kompenzátor, a to na konci potrubní trasy v místě připojení do sání sekundárního ventilátoru a v místě nejdelšího úseku před prvním kolenem, viz schéma přílohy.

8.1.4 Radiální ventilátor

Navrhuji radiální ventilátor RSM 900 1/1.05 ZVVZ MACHINERY, a.s., Milevsko. K regulaci výkonu radiálního ventilátoru se nejčastěji používá regulační ústrojí v podobě klapky, umístěné na sání, nebo otáčková regulace pomocí frekvenčního měniče. Volím regulaci frekvenčním měničem, která je levnější a energeticky úspornější. Ověření výpočtem příkon ventilátoru dle vztahu (8.15).

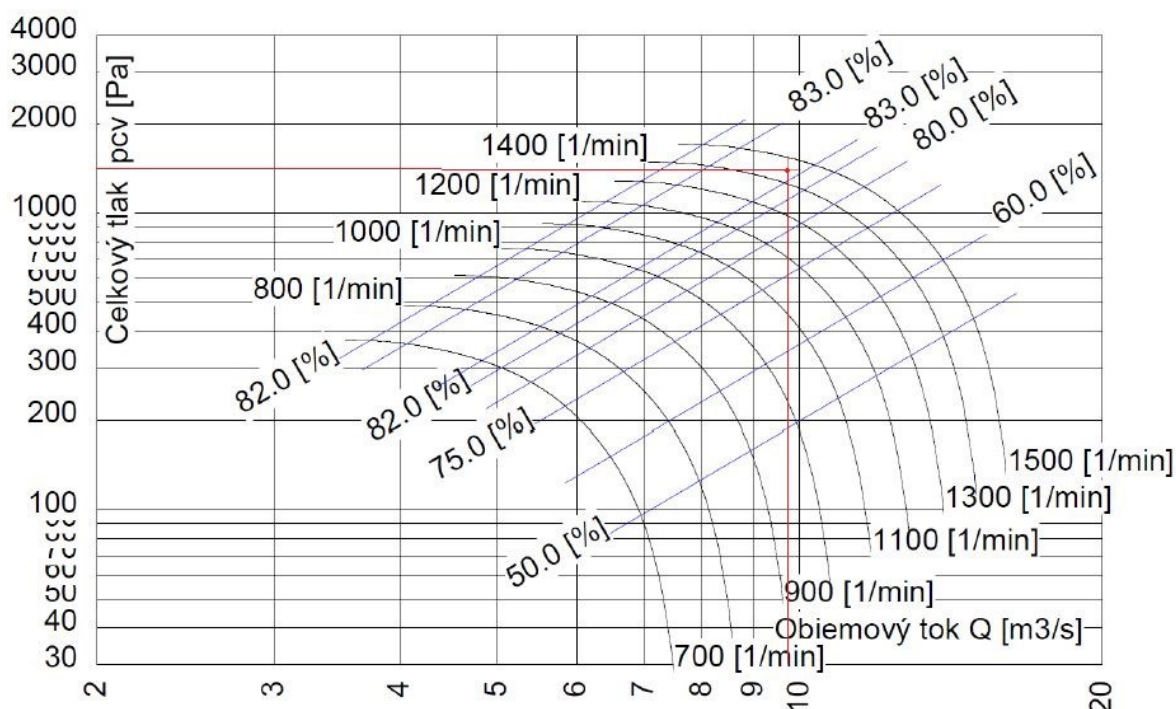
$$P_p = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_c} \quad [\text{W}] \quad (8.15)$$

kde: η_c ... účinnost ventilátoru dle výkonové charakteristiky [1]

$$P_p = \frac{\frac{35000}{3600} \cdot 1413}{0,835} = 13299 = 16,5 \quad [\text{kW}]$$

Pro zadané parametry, kterými je účinnost ventilátoru 83,5 % dle obrázku (8.2) a celkové tlakové ztráty 1413 Pa vychází příkon na spojce ventilátoru na 16,5 kW. Po

konzultaci s technikem ZVVZ MACHINERY, a.s. navrhuji 22 kW třífázový asynchronní elektromotor o výkonu 22 kW, 1470 ot/min.



Obr. 8.2: Výkonová charakteristika radiálního ventilátoru RSM 900 1/1.05
ZVVZ MACHINERY, a.s. [26]

veličina	hodnota	jednotka
průměr ventilátoru	900	mm
otáčky oběžného kola	1456	ot.min ⁻¹
objemový průtok spalin	9,722	m ³ .s ⁻¹
účinnost ventilátoru	83,5	%
celkový tlak	1413	Pa
výkon	16,5	kW

Tabulka 8.1: Technické parametry radiálního ventilátoru RSM 900 1/1.05
ZVVZ MACHINERY, a.s. [26]

8.1.5 Izolace potrubí spalínového potrubí

Vhodný rozměr tloušťky izolace potrubí byl vypočten programem IsoDim^[26]. Pro splnění normy ČSN 07 0620 nesmí být překročena teplota povrchu 50 °C, pro tento požadavek stačí použít 30 mm izolace. Doporučuji provést izolaci v tloušťce 100 mm

z důvodu snížení tepelných ztrát a zamezení kondenzace. Provedené oplechování potrubí chrání před mechanickým poškozením a venkovním prostředím.

8.2 Investiční náklady navržené recirkulace spalin

č. p.	Položka	Cena Kč bez DPH
1	Projektové práce	500 000,00
2	Recirkulační ventilátor včetně elektromotoru	396 000,00
3	Betonová základová deska	50 000,00
4	Potrubí DN 1000 včetně	463 000,00
5	Spojovací a těsnicí materiál potrubí	35 000,00
6	Doprava	50 000,00
7	Uzavírací nožové šoupátko	200 000,00
8	Závěsy	400 000,00
9	Kompenzátory	150 000,00
10	Nátěry	40 000,00
11	Izolace a oplechování	400 000,00
12	Dodávka elektro a MaR zařízení	300 000,00
13	Montážní práce strojní, elektro a MaR	2 300 000,00
14	Seřízení a uvedení do provozu	300 000,00
15	Dokumentace DSP	60 000,00
Celkem		5 644 000,00 (bez DPH)

Tabulka 8.2: Rozpočet investičních nákladů recirkulace spalin

Investiční náklady pro realizaci navržené varianty primárního opatření v provedení recirkulace spalin jsou dle tabulky (8.2) cca 6 000 000 Kč bez DPH.

9. ZÁVĚR

Zadáním diplomové práce byl návrh úprav fluidního kotle K11 ENERGETIKY TŘINEC pro snížení emisí NO_x pod hranici $200 \text{ mg.m}^{-3}\text{N}$.

V úvodní části práce je zpracován přehled fluidních kotlů ve vazbě na způsob podávání paliva do kotle. Z přehledu jednoznačně vyplývá převaha mechanické dopravy před pneumatickou dopravou paliva do kotle. Dále byly shrnuty nejdůležitější informace potřebné k objasnění problematiky emisí při provozování stacionárních spalovacích zařízení. Teoretická část dále popisuje vznik a mechanismy snižování oxidu dusíku, které dělíme na primární a sekundární metody.

Ve výpočtové části jsem vypočítal tepelnou a hmotovou bilanci fluidního kotle K11, kde z výsledku vyplývá, že účinnost parního kotle ovlivňuje nejvíce komínová ztráta.

Návrh na snížení emisí NO_x byl založen na spalovacích zkouškách, kde byl jednoznačně prokázán negativní vliv dopravního vzduchu paliva na tvorbu emisí NO_x . Jedná se o množství sekundárního vzduchu při provozu kotle u nižšího výkonu cca pod 60 % jmenovitého výkonu. Tento sekundární vzduch používány jako nosné medium pneumatické dopravy nesmí klesnout pod minimální hodnotu předepsanou výrobcem daného kotle. Vlivem této podmínky narůstá přebytek vzduchu a roste komínová ztráta.

Fluidní kotel vlivem nízké spalovací teploty do cca 950°C zamezuje vzniku rychlých oxidů dusíku. Následující návrh se proto zaměří na produkci termických a palivových oxidů dusíku, které ovlivním zejména snížením koncentrace kyslíku v oblasti plamene a přebytkem vzduchu.

Návrh předpokládá vyloučení pneumatické dopravy a náhradu dopravního vzduchu paliva spaliny. Dopravu paliva navrhuji pomocí korečkového vertikálního a šnekového dopravníku. Náhradu části dopravního vzduchu paliva spaliny navrhuji provést pomocí instalací recirkulace spalin.

Realizací navrženého primárního opatření dojde ke snížení emisí NO_x pod hranici $200 \text{ mg.m}^{-3}\text{N}$ v celém regulačním rozsahu kotle. Dalším pozitivem je zvýšení účinnosti a snížení komínové ztráty.

Nutné investiční náklady pro realizaci náhrady pneumatické dopravy za dopravu mechanickou se pohybují kolem $12\,000\,000,- \text{ Kč}$ a realizaci navržené recirkulace spalin odhaduji na $6\,000\,000,- \text{ Kč}$. Tyto investice u velkých energetických kotlů mají však rychlou návratnost.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za jeho odbornou pomoc, trpělivost a ochotu při zpracování této práce.

Tato diplomová práce vznikla s podporou infrastruktury centra ENET.

Bc. Marek Goryczka

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČECH, Bohumír. *Fluidní spalovací zařízení v energetice: Fluidized bed combustion devices in energetics : teze habilitační přednášky*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN 978-80-248-2490-1.
- [2] ČECH, Bohumír. *DIAGNOSTICKÉ METODY MĚŘENÍ SPALINOVÝCH TRAKTŮ: DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE*. Polytechnika Śląska Gliwice, 1998.
- [3] ANDREOVSKÝ, Jan. Spalování paliv - Kotle. In: *Http://www.ekomonitor.cz/* [online]. Praha: United Energy a.s., 2013 [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/./10_dil_5b_tisk_andreovsky.pdf
- [4] BARTOVSKÝ, Tomáš. *Analýzátory emisí: [Přehled metod pro kontinuální měření plyných znečišťujících látek]*. 1. vyd. Praha: VUSTE, 1994, 160 s.
- [5] Zákon MŽP ČR č.201/2012: Sb. O ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů 2012*. 2012.
- [6] Vyhláška MŽP ČR č.415: O přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *415/2012*. 2012.
- [7] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public s. r. o., 2011, roč. 17, 18 - 2011. ISSN ISSN 1210-9592.
- [8] Monitoring & Control. *Dust Monitoring: products* [online]. Hamburg, Germany: DURAG GROUP, 2016 [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
<http://www.durag.com>
- [9] Tvorba škodlivin při spalování. *Studijní materiály* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
<http://vec.vsb.cz/cz/vzdelavani/vyuka/studijni-materialy.html>
- [10] Snižování emisí NOx. *Encyklopedie-energetiky* [online]. Praha: ČEZ, a. s. [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [11] Snižování emisí oxidů dusíku. *Pomocné učební texty TP* [online]. Praha, 2003 [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
homel.vsb.cz/~lih90/_soubory/oo/10-01.pdf

- [12] Redukcja tlenków azotu metodą SNCR ze spalin małych i średnich kotlůw energetycznych. *Projekt SNCR* [online]. Warszawska, Polsko: Ecoenergia Sp. z o.o., 2013 [cit. 2016-05-05].
Dostupné z:
www.eios.pw.edu.pl/./Redukcja%20tlenkůw%20az..pdf
- [13] Místní provozní řád kotle K11, Energetika Třinec, a.s.
- [14] *HODNOCENÍ KOTLOVÝCH ZTRÁT: ČSN 07 0305*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1983.
- [15] *PŘEJÍMACÍ ZKOUŠKY PARNÍCH KOTLŮ: ČSN 07 0302*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. Praha: Český normalizační institut, Praha, 1996.
- [16] *PŘEJÍMACÍ ZKOUŠKY PARNÍCH KOTLŮ, změna 1: ČSN 07 0302*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. Praha: Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [17] *VODOTRUBNÉ KOTLE A POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ - Čast 15: Přejímací zkoušky: ČSN EN 12952-15*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. Praha: Český normalizační institut, Praha, 2004.
- [18] ŠEVELOVÁ K. A KOL. *Parní kotle: (návody do cvičení)*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007.
- [19] GAJDŮŠEK, Jaroslav; ŠKOPÁN, Miroslav. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vyd. Brno: rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988.
- [20] ČERNÝ, Václav; JANEBA, Břetislav; TEYSSLER Jiří. *Parní kotle*. Praha: NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1983.
- [21] RAJNIAK, Ivan. *Tepelnoenergetické a emisné merania*. Bratislava: Ister Science, 1997. ISBN 80-88683-20-3.
- [22] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [23] NERAK GmbH Fördertechnik
- [24] RATAJ a.s.
- [25] TRANSLOG spol. s r.o.
- [26] ZVVZ MACHINERY, a.s.
- [27] Divize Isover, Saint-Gobain Construction Products CZ, a.s.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Vznik a základní typy fluidní vrstvy	12
Obr. 2.2: Schéma kotlu s cirkulující fluidní vrstvou bez a s externím chladičem	13
Obr. 2.3: Fluidní kotel: doprava paliva nad fluidní vrstvu	14
Obr. 2.4: Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou	14
Obr. 2.5: Fluidní kotel: pneumatická doprava paliva pod fluidní vrstvu	14
Obr. 2.6: Fluidní kotel koncepce IGNIFLUID	15
Obr. 2.7: Fluidní kotel K14, Duklafluid	16
Obr. 2.8: Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou: pneumatická doprava paliva	17
Obr. 2.9: Schéma kotle FK1 a FK2 v ČEZ, a.s. Elektrárně Hodonín	18
Obr. 3.1: Schéma přístrojů pro kontinuální měření emisí	23
Obr. 3.2: Infračervený analyzátor URAS	24
Obr. 3.3: Schéma sondy s elektrochemickým článkem	25
Obr. 3.4: Instalace analyzátoru u neextraktivní metody	25
Obr. 3.5: Optický monitor koncentrace prachu	26
Obr. 4.1: Tvorba NO _x při spalování v závislosti na teplotě	27
Obr. 4.2: Schéma vstřikování reagentu	29
Obr. 4.3: Katalytická vložka	30
Obr. 4.4: Technologické schéma umístění katalyzátoru SCR	30
Obr. 5.1: Fluidní kotel K11 ENERGETIKA TŘINEC, a.s.	31
Obr. 6.1: Vymezení hranic parního kotle K11 včetně pomocných zařízení	34
Obr. 6.2: Přepočet mezi stavy	35
Obr. 7.1: Schéma navržené mechanické dopravy paliva do kotle K11	55
Obr. 7.2: Korečkového dopravník NERAK typ WB:	56
Obr. 7.3: Schéma šnekového dopravníku	57
Obr. 7.4: Šnekový dopravník	57
Obr. 8.1: Schéma vzduchu a navržené recirkulace spalin kotel K11	60
Obr. 8.2: Výkonová charakteristika radiálního ventilátoru RSM 900 1/1.05 ZVVZ MACHINERY, a.s.	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1: Specifický emisní limit	20
Tabulka 3.2: Vybrané škodliviny a jejich vlastnosti	21
Tabulka 5.1: Parametry kotle K11	32
Tabulka 6.1: Toky energií vstupujících a vystupujících ze soustavy	35
Tabulka 6.2: Prvkový rozbor paliva dodaný laboratoří Enviform, a.s.	36

Tabulka 6.3: Poměr popelové bilance a hmotnostní podíl uhlíku v tuhých zbytcích	41
Tabulka 6.4: Koeficienty A (I), B (I), C (I) složek spalín a vzduchu	45
Tabulka 6.5: Přepočtené hodnoty u odsířování	52
Tabulka 6.6: Hodnoty ztrát a účinnosti	53
Tabulka 7.1: Technické parametry korečkový vertikální dopravník NERAK, WB370	56
Tabulka 7.2: Parametry šnekovice	58
Tabulka 7.2: Rozpočet investičních nákladů mechanické dopravy paliva	59
Tabulka 8.1: Technické parametry radiálního ventilátoru RSM 900 1/1.05 ZVVZ MACHINERY, a.s	65
Tabulka 8.2: Rozpočet investičních nákladů recirkulace spalín	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: DOPRAVA PALIVA K11

Číslo výkresu GOR 0031 – 16 – 01

2: RECIRKULACE SPALIN K11

Číslo výkresu GOR 0031 – 16 - 02